

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 4/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 4
2023**

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

Сквозной номер 173

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 4
2023**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.04.2023.
Подписан в свет	28.04.2023.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,56. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 132	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Станислав Емнюло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности,

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Редакторы: Татьяна Владимировна Бердникова, Людмила Борисовна Корзухина

Дизайн и верстка: Александр Дмитриевич Федотов

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.04.2023

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Layout: *Aleksandr D. Fedotov*

Editors: *Tat'yana V. Berdnikova, Lyudmila B. Korzukhina*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

П.В. Панухин

Эволюция архитектуры фортификаций Крымского перешейка XV – середины XVIII веков 493

А.А. Коста, А.А. Семина

Формирование научно-образовательных комплексов экологической направленности
на примере Краснодарского края 501

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

А.М. Бударин, Г.И. Ремпель, А.А. Камзолкин, В.Н. Алехин

Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением 517

В.А. Пишеничкина, Б.С. Гриценко, А.В. Глухов, В.В. Габова, М.Е. Дубовский

Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения
с учетом коррозионного износа 533

А.Р. Сафаров, В.Б. Дорожнинский, В.И. Андреев

Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов 545

Е.А. Мелёхин

Анализ напряженно-деформированного состояния пролетной трехгранной фермы
при линейных нагрузках 556

А.В. Коргин

Логарифмический декремент колебаний мостов из алюминиевых сплавов 572

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.Ю. Глинянова, В.Т. Ерофеев, В.В. Афонин

Экологический мониторинг территорий условно чистых зон Волгоградской агломерации 584

Т.В. Иванкова, Л.Н. Фесенко

Мониторинг и прогнозирование состояния сооружений в бассейнах малых рек юга России 595

А.Л. Суздалева, М.Ю. Слесарев, Б. Жаргалсайхан

Геоэкологические условия строительства технопарка по программе
реновации региона Налайх (Монголия) 607

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.Г. Гогин, И.Г. Кантаржи

Численное моделирование дифракции морских волн со случайными фазами на оградительных сооружениях . . 615

А.С. Бестужева, А.Б. Абдулов

Учет анизотропных свойств галечниковых грунтов в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин . . 627

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Х.Ю.Б. Хуссейн, С.А. Болотин, Н.К.Р. Хурейни, Х. Бохан

Regression rationing of labour costs based on the estimation of their actual values by neural network modelling
(Регрессионное нормирование трудозатрат на основе оценки их фактических значений
методом нейросетевого моделирования) 638

Требования к оформлению научной статьи 651

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Petr V. Panukhin

Evolution of the architecture of the Crimean Isthmus fortifications in the XV–mid XVIII centuries 493

Anton A. Kosta, Anastasia A. Semina

**Using the case of the Krasnodar Territory to establish centers
for research and education focused on environmental protection 501**

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

Alexander M. Budarin, Georgy I. Rempel, Alexey A. Kamzolkyn, Vladimir N. Alekhin

Stress-strain concrete model with double independent reinforcement 517

Valeria A. Pshenichkina, Boris S. Gritsenko, Anton V. Glukhov, Victoria V. Gabova, Maxim E. Dubovsky

**Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account
corrosion wear 533**

Aziz R. Safarov, Vladimir B. Dorozhinskij, Vladimir I. Andreev

Implementation of CSCM concrete numerical model for domestic concrete classes 545

Evgeniy A. Melyokhin

Analysis of the stress-strain state of the spanning trihedral truss under linear loads 556

Andrey V. Korgin

Logarithmic decrement of vibrations of aluminum alloy bridges. 572

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Irina Yu. Glinyanova, Vladimir T. Erofeev, Viktor V. Afonin

Ecological monitoring of conditionally clean areas in Volgograd agglomeration 584

Tatyana V. Ivankova, Lev N. Fesenko

Monitoring and forecasting the condition of structures in the small river basins in southern Russia 595

Antonina L. Suzdaleva, Mikhail Yu. Slesarev, Bolortuya Jargalsaihan

**Geocological conditions for the construction of a technology park under the Nalaikh region renovation programme
(Mongolia). 607**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Aleksandr G. Gogin, Izmail G. Kantarshi

Numerical simulation of sea-wave diffraction with random phases on breakwaters 615

Alexandra S. Bestuzheva, Alisher B. Abduloev

Consideration of anisotropic properties of pebble soils in calculations of stability of slopes of soil dams 627

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Khoshnaw Y.B. Hussein, Sergey A. Bolotin, Nadim Q.R. Huraini, Haitham Boxan

Regression rationing of labour costs based on the estimation of their actual values by neural network modelling. . 638

Requirements for research paper design 651

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.493-500

Эволюция архитектуры фортификаций Крымского перешейка XV – середины XVIII веков

Петр Владимирович Панухин

Московский архитектурный институт (Государственная академия) (МАРХИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается процесс эволюции архитектуры Перекопской фортификационной линии (Крым) со времен ее основания князем Владимиром, строительства Турцией и до реконструкции в эпоху Российской империи. Важное стратегическое положение Перекопского перешейка явилось определяющим фактором строительства на нем мощных укреплений в различные исторические эпохи. Последовательно анализируются основные этапы строительства вала и крепости Перекоп во времена походов русских князей на Константинополь, в период владения Крымским полуостровом османами и в эпоху Российской империи. Исследуются методика строительства предполья, рва, вала, куртин, башен и цитадели крепости Перекоп; метрологические закономерности ее объемно-пространственной композиции и строительные материалы, использованные при возведении вышеуказанных укреплений. Также подчеркивается, что система фортификаций Перекопского перешейка служила одной из первых русских укрепленных линий, значение которой актуально и в настоящее время как буферного пространства, отделяющего Крым от материка.

Материалы и методы. На основании изучения исторических письменных, графических и литературных источников и метрологического анализа объемно-пространственной композиции крепости Перекоп исследуются архитектурные, строительные, планировочные и конструктивные особенности фортификаций Крымского перешейка.

Результаты. Выявлены три этапа эволюции фортификационных сооружений Крымского перешейка: 1) русские острожные укрепления земляного вала Перекопа X–XV вв.; 2) турецкая крепость Ор-Капу XVI–XVII вв.; 3) укрепленная линия, построенная по системе Вобана русскими военными инженерами в XVIII в. Раскрыты стратегические причины модернизации перекопских укреплений. Проведен сравнительный анализ планировочных и строительных приемов, используемых на каждом этапе реконструкции крепости.

Выводы. Пристальный интерес к укреплениям Перекопа на протяжении более восьми веков был обусловлен стратегическим пространственным позиционированием Крымского перешейка как «Ворот Крыма» со стороны материка и требовал использования самых передовых фортификационных технологий в условиях постоянной модернизации, связанной с совершенствованием осадной военной техники. Перекопские укрепления не утратили своего стратегического пространственного значения и в настоящее время.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Перекоп, Азов, Крым, Таврика, Османская империя, Российская империя, фортификация, Петр Великий, Николаас Витсен

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Панухин П.В. Эволюция архитектуры фортификаций Крымского перешейка XV – середины XVIII веков // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 493–500. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.493-500

Автор, ответственный за переписку: Петр Владимирович Панухин, panuh@mail.ru.

Evolution of the architecture of the Crimean Isthmus fortifications in the XV – mid XVIII centuries

Petr V. Panukhin

Moscow Institute of Architecture (State Academy) (MARKHI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Architectural evolution of the Perekop fortification line (Crimea) since its foundation by Prince Vladimir, its construction by Turkey and till reconstruction in the Russian Empire times is considered. The important strategic location of the Perekop Isthmus was a determining factor in building mighty fortifications there in various historical epochs. The author consistently analyzes the main stages of the construction of the rampart and the Perekop fortress during the campaigns of Russian princes to Constantinople, during the Ottoman occupation of the Crimean peninsula and finally during the Russian Empire times. There are analyzed methods of building Perekop fortress' bastion, moat, rampart, curtain walls, towers and citadel, metrological regularities of its spatial composition and construction materials used in the process of fortification building. It is also emphasized that the system of fortifications of the Perekop Isthmus served as one of the first Russian fortified lines, the value of which is very relevant at the present time as a buffer space separating Crimea from the mainland.

Materials and methods. On the basis of studies of historical written, graphic and literary sources and metrological analysis of the volumetric and spatial composition of the Perekop fortress, the architectural, building, planning and constructive peculiarities of the fortifications of the Crimean Isthmus are studied.

Results. Three stages of evolution of the Crimean Isthmus fortifications: 1) Russian fortifications of the Perekop earthwork of the X–XV centuries; 2) Turkish fortress Or-Kapu of the XVI–XVII centuries; 3) fortified line built by Russian military engineers in the XVIII century using the Voban system. The strategic reasons for the modernization of the Perekop fortifications are revealed. A comparative analysis of planning and building methods used at each stage of the fortress reconstruction is carried out.

Conclusions. The keen interest in the Perekop fortifications throughout more than eight centuries was caused by the strategic spatial positioning of the Crimean Isthmus as the “Gateway to Crimea” from the mainland and required the usage of the most advanced fortification technologies in the conditions of permanent modernization connected with improvement of siege military technology. The Perekop fortifications have not lost their strategic spatial significance at the present time.

KEYWORDS: Perekop, Azov, Crimea, Taurica, Ottoman Empire, Russian Empire, fortification, Peter the Great, Nicolaas Witsen

FOR CITATION: Panukhin P.V. Evolution of the architecture of the Crimean Isthmus fortifications in the XV – mid XVIII centuries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):493-500. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.493-500 (rus.).

Corresponding author: Petr V. Panukhin, panuh@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Фортификационная архитектура играла важную роль во все времена цивилизационного позиционирования Крыма. Начиная с античных греческих времен VII в. до нашей эры границы Таврического полуострова защищали стены легендарных полисов Херсонеса, Пантикапея, Мермекия, Порфмия. С середины I в. все Северное Причерноморье и Таврика позиционировались как удаленные провинции Римской империи и использовались как территории работорговых рынков или как места ссылки. В IV в., после распада Римской империи, Таврический полуостров стал частью Византии. Стены античных городов были укреплены, получила свое развитие торговля с Востоком, столицей византийской Таврики стал переименованный в Херсон Херсонес. Однако через два столетия Крым заволежали хазарские племена, и лишь во второй половине X в. на полуостров вернулся русский мир: сначала князь Святослав Игоревич разгромил хазар, а затем в 988 г. князь Владимир Красное Солнышко отвоевал Херсон (Корсунь), где и принял христианскую веру.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основании материалов исторических: письменных, графических и литературных источников крепости Перекоп были выявлены упоминания первых укреплений перешейка. Так, в «Повести временных лет» название «Перекоп» используется для обозначения рва, выкопанного на перешейке между херсонскими степями и Таврическим полуостровом [1]. Князь Владимир придавал весьма важное стратегическое значение перешейку. Метрологические исследования остатков вала Перекопа показали, что он был углублен с целью защиты от хазарской конницы в конце X в. Из отвалов рва был сформирован вал с острогом (частоклом) наверху.

На основании археологического анализа объемно-пространственной композиции крепости было выявлено, что Острожный вал Перекопа в течение более двух веков защищал Крымский полуостров от набегов со стороны Дикой степи [1]. В XI в. Крым входил в состав русского княжества Тмутаракань. Анализ исторических карт-портюланов показал, что Перекоп был практически единственной модернизированной крепостью Тмутараканского княжества, так как новые крепости в Крыму почти не строились в силу того обстоятельства, что прежние укрепления античных греческих городов были еще достаточно прочны и хорошо защищали полуостров со стороны моря. В ходе исследований с применением метода историко-архитектурного анализа были выявлены три этапа эволюции фортификационных сооружений Крымского перешейка:

- 1) русские острожные укрепления земляного вала Перекопа X–XV вв.;
- 2) турецкая крепость Ор-Капу XVI–XVII вв.;
- 3) укрепленная линия, построенная по системе Вобана русскими военными инженерами в XVIII в.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фортификационное строительство в Крыму оживилось с приходом на полуостров генуэзских и венецианских торговых компаний, которые укрепили старые и вновь отстроили новые крепости в таких городах, как Сугдея (Судак), Кафа (Феодосия), Керкинитида (Евпатория), Чембало (Балаклава). Византийцы и генуэзцы использовали эти крепости как огромные защищенные терминалы для складирования своих товаров на Великом Шелковом пути. Толстые каменные стены и башни этих терминалов могли выдержать натиск достаточно мощной корабельной артиллерии того времени [2, с. 219].

В 1475 г. крымские города, завоеванные турками, вошли в состав Османской империи. Именно с 1475 г. следует вести отсчет укреплению границ

Крыма по всему их периметру, в том числе и со стороны северного Перекопского перешейка, соединявшего полуостров с материком. Эта заболоченная полоса, простиравшаяся от нынешнего Гнилого моря (Сиваша) на востоке и до Ишуни на западе, тем не менее была прорезана сухопутными проходимыми участками, чрезвычайно уязвимыми для внешнего нападения с плоской степной стороны Дикого поля (современная Херсонская область) [3]. Чтобы защитить Перекоп, османы решили на первых порах восстановить вдоль перешейка ров Владимира, а из извлеченного грунта заново отсыпать вал, закрыв его сверху «тюфяком». Тюфяк представлял собой смесь суглинка и булыги и служил защитой от выветривания и артиллерийского обстрела. Подобный вал и поселение, которое он защищал, существовали еще с античных времен и назывались в разные эпохи Тафрос, Ферах-керман, Ор-Капы (Ор-Капу). Вновь восстанавливаемый вал по своей сути представлял простую классическую укрепленную линию. Такие линии вдоль границ своих колоний Османская империя строила повсеместно на огромной территории от Африки до Персии [4]. Северная линия на Крымском перешейке сохранила свое старое имя Ор (крымско-тат. «ог» — ров).

На карте Гесселя Геритца 1614 г., которая была составлена на основе кальки чертежа царевича Федора Борисовича Годунова в 1600 г., Перекоп обозначен знакомым русским названием. По утверждению известного ученого-исследователя Крыма Петра Палласа, «Перекоп» являлся исконным славянским названием топонима, от которого произошли все остальные, включая крымско-татарское, греческое и караимское [5].

Главной доминантой Перекопского вала турецкого времени была кубообразная земляная крепость Ор-Капу (тюрк. — «крепость на рву»). Она занимала центральное место в укрепленной линии протяженностью более 7 км. Изначально поверх вала был устроен открытый валганг (полоса для установки артиллерийских орудий) с невысоким каменным бруствером, так как строительство стены на всем протяжении многокилометрового вала представлялось турецким фортификаторам делом долгим и дорогим [6]. Однако такая архитектура укрепленной линии турецкого Перекопа была крайне неэффективной, и вал практически не мог сдержать многочисленных вылазок ногайцев, адилей, шайдаков, ормитов и других кочевых обитателей Дикой степи, которые совершали набеги на Крым с целью грабежа и добычи ясыка (пленных), которых впоследствии продавали самим же османам в рабство. Главные ворота у Перекопской крепости располагались с севера через Ор (ров). Въезд осуществлялся с помощью подъемного моста, расположенного между двух квадратных каменных башен. Вход вел в цитадель, представлявшую собой обвалованную территорию прямоугольных очертаний со сторона-

ми $1,5 \times 3,0$ берида (ок. 302×604 м), внутри которой располагались горжевые (т.е. смежные с валом) казармы для размещения войска, помещения для хранения запасов продовольствия, подземные резервуары с питьевой водой на случай осады, арсенал и артиллерийская мастерская. Общее расположение сооружений крепости изображено на чертеже «План крепости Ора» на рис. 1.

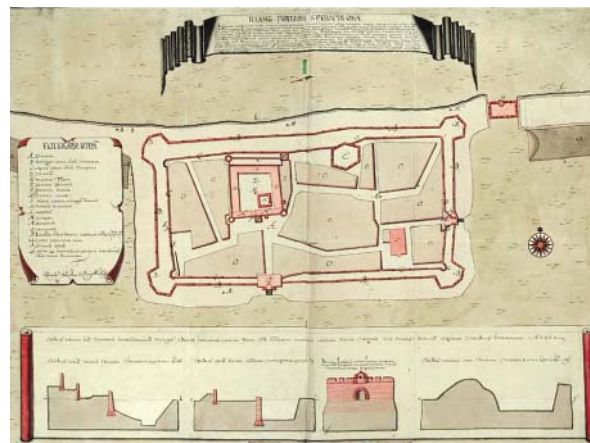


Рис. 1. План турецкой крепости Ора. Архитектурный чертеж с показом планировки цитадели крепости Ор-Капу. 1738, Государственный Исторический музей, отдел ИЗО

Fig. 1. The plan of the Turkish fortress Ora. The architectural drawing showing the layout of the citadel of the fortress Or-Kapu, 1738, State Historical Museum, Visual Arts Department

Развод караула для охраны Перекопской линии осуществлялся по валгангу — плоскому укатанному гребню вала, на котором стояли орудия, что представляло большую опасность для защитников крепости в силу того, что в открытой степной зоне вся поверхность вала хорошо просматривалась и простреливалась. Глубина рва также была недостаточной и составляла 6 кирабов (ок. 2,60 м) [7].

Учитывая вышеуказанные несовершенства крепости, турецкий сераль пригласил итальянских фортификаторов из Генуи, которые в конце 1560-х гг. углубили вдвое ров и укрепили вал: была увеличена высота бруствера до 10 кирабов (ок. 4,25 м), и он фактически превратился в стену. Кроме того, в этой новой стене были устроены стрелковые и артиллерийские амбразуры нижнего подошвенного боя (на высоте 1,5 кираба (ок. 64 см)) и среднего ружейного боя (на высоте 3 кираба (ок. 130 см)). Также с шагом в 100 кирабов (42,5 м) были сделаны насыпи для установки артиллерийских орудий высотой 8 кирабов (3,40 м), которые позволяли стрелять из артиллерийских орудий поверх стены. На месте насыпей с наружной стороны были устроены полубашни для защиты от артиллерии против-

ника. У каждой артиллерийской полубашни имелся пандус для закатывания орудий и был устроен свой земляной пороховой погреб и укрытия для бомбардиров. Однако и этого усиления Перекопской линии оказалось недостаточно. В конце XVI в. крепостное строительство под руководством итальянских архитекторов продолжилось. При крымских ханах Менгли Гирее и Сагиб Гирее окончательно сформировалась объемно-пространственная композиция Перекопской укрепленной линии [8]. Перекоп в конце XVII в., изображенный с натуры на гравюре голландца Николааса Витсена, друга Петра Велико-го, представлен на рис. 2.

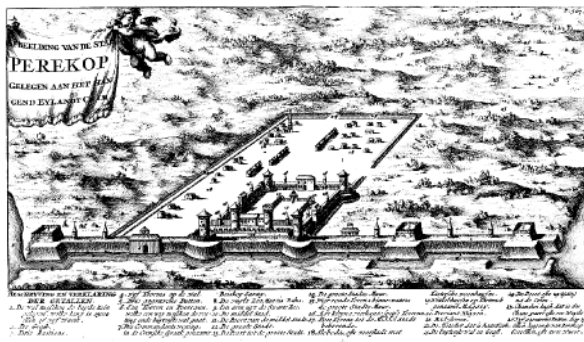


Рис. 2. Н. Витсен. Крепость Перекоп в конце XVI в. Гравюра на меди, Амстердам, 1710

Fig. 2. N. Witsen. Perekop fortress at the end of the XVI century. Engraving on copper, Amsterdam, 1710

Витсен запечатлел Перекоп в период знаменитых Азовских походов. В структуре цитадели он изобразил восемь башен, три бастиона, эскарпные рвы и уходящие за горизонт стены крепости с рядовыми башнями-контрфорсами. Равно как стены и башни Перекопской линии, эскарпный ров Перекопа был облицован камнем, что являлось типичным именно для итальянской фортификационной школы. Ко времени Витсена стены укрепленной линии увеличились до высоты 8 м, количество башен выросло до 20, у башен также увеличилась высота (до 10 м), были усилены фундаменты и устроены бастионные насыпи с внешней стороны. Тем не менее в том виде, в котором укрепления Перекопа зафиксировал Н. Витсен, они просуществовали всего пять лет, после чего вновь подверглись коренной реконструкции.

Причиной столь острой необходимости модернизировать Перекопскую линию был Второй Азовский поход Петра I, завершившийся полной победой российского оружия и сильно испугавший Османский Сераль. Николаас Витсен предложил Петру оправдавший себя во время войны во Фландрии способ устройства береговых форпостов и укрепленных линий, поддерживаемых небольшими барражирующими флотскими эскадрами. Были

созданы 12 пограничных прибрежных постов, вытянувшихся в линии по обоим берегам Азова. Барражировали суда и вдоль Сиваша, за которым на запад шел перешеек к Перекопу. Впоследствии такие линейные позиционные системы охраны границ, растянутые на большой территории, стали прообразом весьма эффективных укрепленных линий 1730–1850-х гг. Помимо сугубо военных методов усиления охраны южных границ, Петр думал и об иных способах, дающих возможность нейтрализовать агрессию Крымского ханства. Решение этой проблемы Петром I и Николаасом Витсеном виделось также в политической и дипломатической плоскостях. Их точка зрения была единой и заключалась в том, чтобы помешать военному союзу короля Карла XII и хана Девлет II Гирея. Николаас Витсен как управляющий Ост-Индской компанией был, кроме того, заинтересован в безопасной торговле в Черноморском и Азовском бассейнах. В своей переписке с крупными шведскими банкирами и negociантами того времени он специально делал акцент на крымском торговом вопросе и предупреждал партнеров о полной ненадежности ханских купцов и переговорщиков, предостерегая шведов от контактов с ними. Логика этого предупреждения была основана на старом мудром принципе ост-индской и левантйской торговли: «Если партнер обманул вас на рынке, то он обманет и на войне, потому что война — более дорогой товар» [9].

Авторитет Витсена как политика, ученого и коммерсанта был непререкаем, и когда информация о его опасениях дошла до королевских коммерческих советников и самого Карла, шведскому двору ничего не оставалось как в вежливой форме отказать ханским послам в заключении договора о военном сотрудничестве против России. Таким образом, в 1699 г. Витсену удалось расстроить намечавшийся военно-политический союз между шведским королем Карлом XII и крымским ханом Девлетом II Гиреем [10]. Это обстоятельство сыграло впоследствии важную роль в ослаблении ханской власти в Крыму и постепенном распаде и исчезновении самого Крымского ханства, поддерживаемого Османской Портой, которое окончательно произошло во второй половине XVIII в. и было закреплено известным Манифестом Екатерины Великой 1783 г. «О присоединении к Державе Российской Крыма и Тамани». Параллельно с нидерландскими фортификаторами интерес к российскому позиционированию в Причерноморье проявляли и французы. Их взгляд на Россию, в отличие от голландского, был не столь пристален и не столь прагматичен. Петру I не удалось заполучить великого фортификатора Себастьяна ле Престра де Вобана, хотя нужда в новых современных крепостях была очень острой. Тем не менее приглашенный вместо Вобана швейцарец Доменико Трезини с блеском построил не только Петропавловскую крепость, но и возвел

многие гражданские постройки Санкт-Петербурга. Вполне возможно, что французы, видя благорасположенность Петра к немцам и голландцам, не стали проявлять инициативу — место было уже занято.

Тем не менее в отношении реконструкции Перекопа Петром были введены чрезвычайно важные новации. Перекопские линии было решено строить по системе Вобана, а именно: использовать его бастионно-редутную Ландаусскую систему. Для этой цели на русский язык был переведен знаменитый трактат Вобана «Книга о атаке и обороне крепостей». Переводчиком выступил отец будущего великого русского полководца А.В. Суворова — Василий Иванович Суворов [11]. В соответствии с доктриной Вобана подходы к Перекопской линии получили эшелонированные линии обороны (параллели). Теперь для того чтобы взять крепость, противнику необходимо было последовательно преодолевать территорию «предполя», состоявшего из трех параллельных друг другу линий окопов. Это значительно сокращало потери оборонявшейся и увеличивало потери нападавшей сторон. Перекоп петровского времени, изображенный английским путешественником и художником Тамасом Паркером, представлен на рис. 3.

Сам ров на всем своем протяжении был укреплен треугольными насыпными бастионами вокруг каждой башни. Противнику приходилось преодолевать не только ров, но и карабкаться на скользкую насыпь бастиона, волоча за собой осадные лестницы, и лишь потом брать стену. Высота башен увеличилась до десяти саженей — 21 м 13 см, а стены

были обложены дополнительными рядами кирпича и получили расширенную галерею верхнего боя с новыми массивными косыми зубцами, от которых ricochetили ядра. Общая протяженность Перекопской линии увеличилась до 8,5 км. Столь продуманная эшелонированная оборона Перекопа делала его практически неприступным. Однако после смерти Петра Великого содержать огромный гарнизон на столь протяженной территории стало непосильно для казны российского государства. После 1725 г. Перекоп опять перешел к туркам.

Востребованность услуг фортификаторов в России не упала и после смерти императора. С одной стороны, это был эффект определенной инерции после мощного петровского толчка, который сдвинул старые представления о позиционировании пространства и поставил фортификацию в ряд важнейших для российского государства наук. С другой стороны, Россия нуждалась в укреплении границ своих южных территорий в условиях нарастающего прессинга со стороны Османской империи. Планам Петра суждено было сбыться позднее, во времена правления императрицы Анны Иоанновны. Тогда, в ходе новой войны с турками, разгоревшейся в 1736 г., русская армия под командованием генерал-фельдмаршала Бурхарда Миниха взяла штурмом османские укрепления у Перекопа, а затем заняла и всю северную степную территорию Крымского полуострова вплоть до Бахчисарая. План военных действий взятия крепости в 1736 г. показан на рис. 4.

Взятие Перекопа, изображенное Николаасом Витсенем, представлено на рис. 5.



Рис. 3. Томас Паркер. Перекоп. Акватинта. 1736, Музей Тавриды

Fig. 3. Thomas Parker. Perekop. Aquatint. 1736, Tavrida Museum

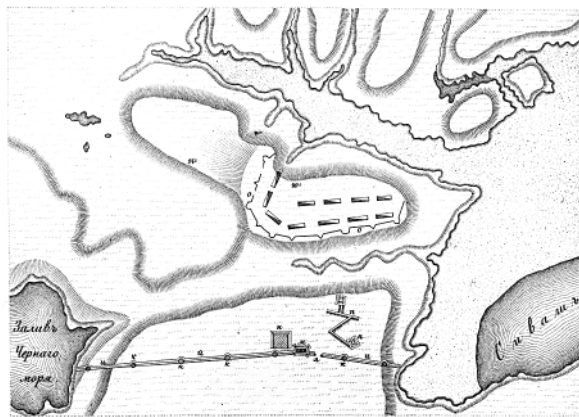


Рис. 4. «Атака Перекопской линии в компанию 1736 г.». План времени второго взятия крепости русскими войсками под командованием Б. Миниха. Рисунок из Военной Энциклопедии Н. Сытина, Санкт-Петербург, 1911

Fig. 4. “Attack of the Perekop line in the company of 1736”. The plan of the Excavation of the time of the second capture of the fortress by Russian troops under the command of B. Minikh. A drawing from: N. Sytin. Military Encyclopedia, St.-Petersburg, 1911



Рис. 5. Николаас Витсен. Взятие Перекопа. Гравюра 1736 г. Музей Амстердама

Fig. 5. Nicolaas Witsen. The capture of Perekop. Engraving of 1736. Amsterdam Museum

Одновременно другая русская армия под командованием генерал-фельдмаршала Петра Ласси с помощью Донской флотилии осадила Азов [12]. Взяв город, Ласси не ограничился локальной победой и, развивая успех, погнал противника вглубь Крыма. Войско крымского хана Махмуд-Гирея было разбито, и русские войска заняли весь восточный и центральный Крым вплоть до Карасубазара [13]. Азовский паша Мустафа-Ага от имени хана признал поражение и вручил Петру Ласси саблю и символические ключи от Азова [14]. В честь победы на Крымском перешейке и под Азовом была выпущена серия гравированных листов для подношения

государыне-императрице Анне Иоанновне с изображениями крепости и картинами капитуляции турецких войск. Момент передачи ключей от Азовской крепости русскому генерал-фельдмаршалу Петру Ласси представлен на рис. 6.



Рис. 6. Азовский паша Мустафа-Ага вручает командующему русской армией Петру Ласси ключи от Азова. Гравюра на меди, Санкт-Петербург, 1736

Fig. 6. Pasha of Azov Mustafa-Aga hands over the key to Azov to the commander of Russian army Peter Lassi. Engraving on copper, St.-Petersburg, 1736

Факту овладения Азовом и Перекопом как чрезвычайно значимыми в стратегическом отношении территориями придавалось огромное значение. Для российской императрицы были изготовлены специальные листы-подношения, приуроченные к торжественному празднеству по случаю взятия крепостей. Один из этих листов, посвященный взятию Перекопской крепости, представлен на рис. 7.



Рис. 7. Лист подношения императрице Анне Иоанновне по случаю взятия Перекопа. 1738, Государственный Русский музей

Fig. 7. The offering sheet to Empress Anna Ioannovna on the occasion of the Perekop capture. 1738, State Russian Museum

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все три этапа эволюции фортификационных сооружений Крымского перешейка: острожные укрепления X–XV вв., крепость Ор-Капу XVI–XVII вв. и укрепленная линия, построенная Петром I в XVIII в., решали стратегическую задачу обороны Крыма.

Пристальный интерес к укреплениям Перекопа на протяжении более восьми веков был обусловлен пространственным позиционированием перешейка как «Ворот Крыма» со стороны материка и требовал использования самых передовых строительных фортификационных технологий в условиях постоянной модернизации, связанной с совершенствованием осадной военной техники.

После победы на Перекопе Россия получила во владение Азов и полосы суши вдоль Днепра

при условии, что на этих землях не будет новых укреплений. Однако эти условия остались лишь на бумаге, в то время как мощь Российской империи в черноморском бассейне продолжала расти [8]. Укрепления Перекопа устояли, флот был не только сохранен, но и умножен. Перекопские укрепления не утратили своего стратегического пространственного значения и в настоящее время.

Решение стратегической задачи полного господства в Северном Причерноморье было окончательно достигнуто в правление Екатерины Великой, когда после победы в русско-турецкой войне 1768–1774 гг. южные границы империи значительно расширились. В соответствии с Манифестом 1783 г. «О присоединении Крыма и Тамани» Таврический полуостров и Таманские земли вошли в состав России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Греков С.Д. Повесть временных лет о походе Владимира на Корсунь // Известия Таврического общества истории, археологии и этнографии. Т. III. Симферополь, 1929. С. 126, 131.

2. Мурзакевич Н.Н. История генуэзских поселений в Крыму. Одесса : Гор. тип., 1837.

3. Троицкий Н.А. Русско-турецкая война 1877–1878 годов. Россия в XIX веке : курс лекций. М. : Высшая школа, 1997. С. 239.

4. Генов Ц. Русско-турецкая война 1877–1878 гг. / пер. с болг. К. Герасимова. София : София Пресс, 1979. 431 с.

5. Паллас П.С. Поездка во внутренность Крыма, вдоль Керченского полуострова и на остров Тамань // Записки Одесского общества истории и древностей. Т. 13. / пер. с нем. М. Савич. Одесса, 1883. 73 с.

6. Панухин П.В. Spatial defense system of the crimean peninsula during the period of the Paris treaty of 1856–1870 // Архитектон: Известия вузов. 2022. № 3 (79). Ст. 5. DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)5 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49599831>

7. Fethi Yücel. Pratik Matematik, Türkiye İş Bankası Kültür yayınları. Ankara, 1990. 15 p.

8. Кирпичников А.Н. Россия XVII века в рисунках и описаниях голландского путешественника Николаса Витсена. СПб. : Славия, 1995. 208 с.

9. Витсен Н. Путешествие в Московию, 1664–1665 : Дневник / пер. со староголл. В.Г. Трисман. СПб. : Симпозиум, 1996. 265 с.

10. Turkish nin 75 years. Tempo yayınları. İstanbul, 1998. P. 53.

11. Вобан Себастьян Ле Претр. Книга о атаке и обороне крепостей / пер. с фр. В.И. Суворова. СПб., 1744.

12. Milner T. The Crimea: Its Ancient and Modern History: The Khans, the Sultans, and the Czars. Nabus Press, 2010. P. 14.

13. Мягков М.Н. Фельдмаршалы XVIII века. Петр Ласси, Христофор Миних, Александр Бутурлин, Яков Кейт, Петр Салтыков. М. : ИД Комсомольская правда, 2017. 96 с.

14. Панухин П.В. Пространство и время на картах Крыма. М., Архитектура-С, 2020. 456 с.

Поступила в редакцию 7 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Петр Владимирович Панухин** — кандидат архитектуры, профессор кафедры истории архитектуры и градостроительства, заведующий кафедрой военной архитектуры, лауреат Государственной премии Республики Крым 2022 г. в номинации «Наука и научно-техническое творчество»; **Московский архитектурный институт (Государственная академия) (МАРХИ)**; 107031, г. Москва, ул. Рождественка, д. 11/4, стр. 4; panuh@mail.ru.

REFERENCES

1. Grekov S.D. The Tale of bygone years about Vladimir's campaign on Korsun. *News of the Tauride*

Society of History, Archeology and Ethnography. Vol. 3. Simferopol, 1929; 126,131. (rus.).

2. Murzakevich N.N. *History of Genoese settlements in the Crimea*. Odessa, Mount. Univetrstsy publishers, 1837. (rus.).
3. Troitsky N.A. *Russian-Turkish war of 1877–1878. In Russia in the XIX century : lecture series*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1997; 239. (rus.).
4. Genov Tsvetan. *The Russian-Turkish War of 1877–1878*. Translated from Bulgarian K. Gerasimov. Sofia, Sofia Press, 1979; 431. (rus.).
5. Pallas P.C. A trip to the interior of the Crimea, along the Kerch Peninsula and to the island of Taman. *Notes of the Odessa Society of History and Antiquities. Vol. 13*. Translated from German by M. Savich. Odessa, 1883; 73. (rus.).
6. Panukhin P.V. Spatial defense system of the Crimean Peninsula during the period of the Paris Treaty of 1856–1870. *Architecton: Izvestiya vuzov*. 2022; 3(79):5. DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49599831> (rus.).
7. Fethi Yucel. *Practical mathematics in Turkish and Balcan culture*. Ankara, 1990; 15. (tur.).
8. Kirpichnikov A.N. *Russia of the 17century in drawings and descriptions of the Dutch traveler Nicholas Witsen*. Saint Petersburg, Slavia Publ., 1995; 208. (rus.).
9. Witsen N. *Moscovische Reyse, 1664–1665*. ‘S-Gravenhage, 1966. (nld.).
10. Turkish nun 75 years old. The pace of yayynlary. Istanbul, 1998; 53. (tur.)
11. Vauban Sebastien Le Pretre. *The book about the attack and defense of fortresses*. Translated from French V.I. Suvorov. Saint Petersburg, 1744. (rus.).
12. Milner T. *Crimea: Its ancient and modern history: Khans, Sultans and Tsars*. Nabus Press, 2010; 14.
13. Myagkov M.N. *Field Marshals of the 18 century. Peter Lassi, Christopher Minikh, Alexander Buturlin, Yakov Keith, Peter Saltykov*. Moscow, Komsomolskaya Pravda Publishing House, 2017; 96. (rus.).
14. Panukhin P.V. *Space and time on maps of the Crimea*. Moscow, Architecture-C Publ., 2020; 456. (rus.).

Received February 7, 2023.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S : **Petr V. Panukhin** — Candidate of Architecture, Professor of the Department of History of Architecture and Urban Planning, Head of the Department of Military Architecture, Winner of the State Prize of the Republic of Crimea in 2022 in the nomination “Science and Scientific and Technical Creativity”; **Moscow Institute of Architecture (State Academy)**; bldg. 4, 11/4 Rozhdestvenka st., Moscow, 107031, Russian Federation; panuh@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 727

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.501-516

Формирование научно-образовательных комплексов экологической направленности на примере Краснодарского края

Антон Андреевич Коста¹, Анастасия Александровна Семина²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Монолитное строительное управление-1 (МСУ-1); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования являются особенности функционально-технологической и объемно-пространственной организации научно-образовательных комплексов экологической направленности. Актуальность данной темы обусловлена нехваткой учреждений дополнительного образования и неудовлетворительным состоянием экологической ситуации в Краснодарском крае. Цель исследования заключается в выявлении принципов проектирования научно-образовательных комплексов экологической направленности. Впервые рассмотрены научно-образовательные комплексы экологической направленности как новый тип общественного здания в системе дополнительного образования, выявлена технологическая составляющая и их функциональное наполнение. Определены рекомендации для создания нового типа общественного здания. В ходе экспериментального проектирования отработана концептуальная модель предложенного типа здания в условиях первой климатической зоны.

Материалы и методы. Методика исследования строится на анализе объемно-планировочной организации структуры научных и образовательных центров экологической направленности изучения текстовых и графических материалов в отечественных и зарубежных изданиях, электронных ресурсов по проектированию научных и образовательных учреждений, в том числе на английском языке. Обобщение материалов проводилось на основе методов биоаналогового проектирования, проведения натурных обследований с фотовизуальным анализом. Информационной и эмпирической основой исследования служат действующие на территории Российской Федерации нормативные и законодательные акты, проектная документация.

Результаты. Разработан экспериментальный проект для Имеретинской низменности с центром экологического мониторинга проблем разрушения береговой линии Черного моря, популяции редких видов животных и растений.

Выводы. Определены проблемы, возникающие в связи с негативными природными явлениями, антропогенным воздействием и другими рисками для формирования комфортной городской среды. Предложена классификация градостроительных и объемно-планировочных решений научно-познавательных центров экологической направленности. Выработана архитектурная концепция перспективного научно-образовательного комплекса экологической направленности на примере Краснодарского края на основе комплексных подходов, охватывающая социальные, функциональные, экономические, экологические и эстетические аспекты реализации проектных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура научно-образовательных комплексов, экология, альтернативные источники энергии, бионика, образовательные центры, школы, зеленые технологии, Краснодарский край, окружающая среда, многофункциональный комплекс

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коста А.А., Семина А.А. Формирование научно-образовательных комплексов экологической направленности на примере Краснодарского края // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 501–516. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.501-516

Автор, ответственный за переписку: Антон Андреевич Коста, KostaAA@mgsu.ru.

Using the case of the Krasnodar Territory to establish centers for research and education focused on environmental protection

Anton A. Kosta¹, Anastasia A. Semina²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Monolithic Construction Management-1; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The subject of the research is peculiarities of functional-technological and volumetric-spatial organization of scientific and educational complexes of ecological orientation. Relevance of this topic is determined by the lack of institu-

tions of additional education and the unsatisfactory state of the environmental situation in the Krasnodar Territory. The purpose of the study was to reveal the principles of designing scientific and educational complexes of ecological orientation. For the first time, scientific and educational complexes of ecological orientation are considered as a new type of public building in the system of additional education, the technological component and their functional content are revealed. Recommendations for the creation of a new type of public building have been identified. During the experimental design, a conceptual model of the proposed type of building in the conditions of the first climatic zone was worked out.

Materials and methods. The research methodology is based on the analysis of volumetric-planning organization of the structure of scientific and educational centers of ecological orientation, the study of text and graphic materials in domestic and foreign publications, electronic resources on the design of scientific and educational institutions, including in English. The generalization of the materials was carried out on the basis of methods of biosimilar design, carrying out field surveys with photovisual analysis. The informational and empirical basis of the study is the regulatory and legislative acts in force on the territory of the Russian Federation, as well as the design documentation.

Results. A pilot project for the Imereti lowland with a centre for ecological monitoring of the problems of the Black Sea coastline destruction and the population of rare animal and plant species has been developed.

Conclusions. The problems arising from negative natural phenomena, anthropogenic impact and other risks for the formation of a comfortable urban environment are defined. Classification of urban planning and spatial planning solutions of scientific and educational centers of ecological orientation is proposed. The architectural concept of the perspective ecological scientific and educational complex has been developed on the example of the Krasnodar Territory on the basis of complex approaches, covering social, functional, economic, ecological and aesthetic aspects of realization of design solutions.

KEYWORDS: architecture of scientific and educational complexes, ecology, alternative energy sources, bionics, educational centers, schools, green technologies, Krasnodar Territory, environment, multifunctional complex

Acknowledgements. The authors would like to thank to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Kosta A.A., Semina A.A. Using the case of the Krasnodar Territory to establish centers for research and education focused on environmental protection. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):501-516. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.501-516 (rus.).

Corresponding author: Anton A. Kosta, KostaAA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Основное влияние на экономику Краснодарского края оказывает благоприятное географическое расположение и широкий спектр ресурсов [1]. На территории края расположен Кавказский государственный природный биосферный заповедник, в котором числится национальный парк Сочи, 12 заказников, более 350 памятников природы, 6 дендропарков и ботанических садов.

Промышленность является основным источником загрязнения окружающей среды Краснодарского региона. Оказываемое индустрией воздействие характеризуется ее месторасположением, количеством используемого сырья, материалов и энергии, степенью переработки отходов и завершенностью энергопроизводственных циклов. Предприятия г. Краснодара ежегодно выбрасывают в атмосферу 16,6 тыс. т сернистого ангидрида, 17,7 тыс. т окиси углерода, 2,5 тыс. т углеводородов, в том числе химический комбинат города — 477,2 т окиси углерода, 145 т фурфурола, 16 т серной кислоты и т.д. [2]. Южный регион лидирует по количеству выброса в атмосферу канцерогенного вещества формальдегида. В Краснодарском крае проблемными по количеству выброса в атмосферу ядовитых веществ являются завод минеральных удобрений «Еврохим» в Белореченске и Троицкий йодный завод («Системный алюминий») в Крымском районе. С 2015 по 2020 гг. выбросы на заводе «Еврохим» выросли на 4150,3 % [3].

На территории Краснодарского края есть большое количество машиностроительных, металло-

обрабатывающих, химических заводов, но лидирующей производственной отраслью региона является нефтедобыча. На территории края расположено около 150 крупных, средних и мелких нефтяных месторождений.

Современные процессы хозяйствования, связанные с размещением источников загрязнения, приводят к повышению уровня концентрации опасных веществ в естественных водоемах. Этот фактор усугубляется за счет недостаточной степени очистки выбрасываемых в Черное море сточных вод. Несмотря на процедуры биологической обработки, в воде могут оставаться нитриты и фосфаты, которые негативно воздействуют на микрофлору, способствуя накоплению и развитию микроводорослей [3, 4]. Представленные эффекты в разы усиливаются за счет недостаточной степени развития канализационных сетей, имеющих высокую степень коррозии, вместе с неэффективностью их функционирования [5]. Как следствие, морское побережье загрязняется, что влияет и на состояние экосистемы, истощаются рыбные запасы.

Особенности климатического пояса также оказывают влияние на внутреннюю загрязненность региона. Воздушный бассейн края обладает низкой рассеивающей способностью, что не позволяет за счет влияния атмосферы снижать выбросы некоторых веществ на природном уровне. Транспортные средства становятся вследствие данного фактора одним из значительных источников загрязнения окружающей среды. В воздухе Краснодара, Новороссийска и Сочи можно найти оксид углерода, азота, углеводороды, а также другие вредные вещества,

включая тяжелые металлы и сажу. Однако, обращаясь к причинам постоянного увеличения количества выбросов, приходящихся на автотранспортные средства, необходимо отметить, что основным фактором является эксплуатация старых машин, в том числе с применением неэкологического низкачественного бензина и дизельного топлива [6].

В дополнение к описанным факторам необходимо отметить влияние сельскохозяйственной отрасли, которая зачастую нерационально использует такие загрязняющие вещества, как пестициды, гербициды и др. Все это приводит к снижению качества земельных ресурсов, уплотнению почвы, снижению ее водопроницаемости, а также невозможности полного поглощения направляемого удобрения. В результате больше половины удобрений и прочих веществ попадает в сточные воды, из которых затем приходит в близлежащие реки, озера и море.

Авторами был осуществлен анализ данных, связанных с оценкой степени загрязненности Краснодарского края по различным источникам воздействия, среди которых были выделены: транспорт, электроэнергетические станции, нефтеперерабатывающие заводы, топливно-химические предприятия и комплексы, отрасль строительства, сельское хозяйство, а также отдельное место заняли порты, которые становятся источником концентрации ранее

перечисленных факторов, оказывающих негативное воздействие [7, 8] (рис. 1).

В связи с вышеизложенным мероприятия, ориентированные на реализацию природоохранных функций, являются значимыми на современном этапе развития общественных отношений [9]. При этом особое значение следует уделять вопросам духовно-нравственного воспитания будущих поколений. Современные дети нуждаются в объяснении последствий экологических проблем и необходимости соблюдения мероприятий, ориентированных на охрану окружающей среды. Важным становится совершенствование процессов охраны особо охраняемых природных территорий. Поэтому необходимо сформировать у людей всех поколений, с особым вниманием к детям, четкие представления о территориальной охране природы как важнейшей форме сохранения биологического и ландшафтного разнообразия [9].

В качестве превентивной меры, купирующей нарастающие экологические риски, авторами рассмотрено строительство научно-образовательных комплексов экологической направленности с применением «зеленых» технологий. Цель их создания на территории края и других регионов России — улучшение качества атмосферы, проведение обучающих бесед, семинаров, конференций о правильном



Рис. 1. Экологическая оценка территории Краснодарского края
Fig. 1. Ecological assessment of the Krasnodar Territory

подходе к окружающей среде, а также обеспечение дополнительного мониторинга окружающей среды. В нем можно будет организовать исследовательскую деятельность по эколого-краеведческому и духовно-нравственному воспитанию в рамках изучения объектов особо охраняемых природных территорий [10].

Основополагающим целевым ориентиром при строительстве научно-образовательных комплексов экологической направленности становится возможность уравнивания отношений между человеком и окружающей природой с возможностью установления гармоничного отношения в системе «человек и природа», а также приобретения статуса ответственного лица со стороны человека. В таком случае он занимает активную позицию и выступает в качестве защитника. Фактически формируемая «зеленая» среда связана не только с возможностью обеспечения контакта с природой, но и с необходимостью приобщения к культуре природы, экологическому воспитанию, формированию понимания необходимости заботы о природе, ее поддержании и снижении негативного влияния [11]. Главной целью образовательной деятельности в таких учреждениях становится формирование совокупных объемов знаний, умений и навыков, необходимых для нормальной жизнедеятельности без разрушительного влияния на экологию. В процессе познания ребенок и даже взрослый получает особый опыт сознательного природопользования, взаимодействия с природой, получения «отдачи» от нее. Проявляется этичность и учет всех необходимых для построения хороших взаимоотношений с природой условий духовно-нравственного, творческого и интеллектуального развития. Таким образом, акцент делается на эмоциональной связи человека с природой. Все это подчеркивает высокую значимость экологического образования и воспитания, которые ложатся в основу течения образовательных процессов многих стран [12].

Вопрос экологизации просветительских учреждений решается по-разному. Лидерами в этой области становятся страны Европы и США. Россия же обладает средним уровнем экологизации образовательных пространств. К числу основных причин здесь можно отнести низкую степень информированности о направлении экологизации, отсутствие мотивации людей к изменениям, а также снижение качества и потерю актуальности всех ранее разработанных и существующих стандартов качества, которые не учитывают достаточно значимые критерии [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью выявления архитектурно-пространственных и функционально-технологических особенностей были проанализированы образовательные и научные центры экологической направленности ряда

стран. Полученные данные представлены на рис. 2, 3 и в таблице. Анализ опыта проектирования научных и образовательных центров экологической направленности позволил установить, что основным их отличием является многофункциональность. Большую часть экстерьеров представляют собой живые изгороди с открытыми учебными пространствами, небольшими эко-фермами/грядками, где с посетителями проводятся занятия, на которых рассказывают о важности выращивания овощей и фруктов, а также прививают любовь к природе [14, 15].

Анализ позволил выявить функциональный состав комплексов, представленный следующими зонами:

- 1) научно-исследовательская (лаборатории, мастерские, слайдотеки, компьютерные помещения для исследовательских задач, библиотеки для научных работников);
- 2) учебно-познавательные (учебные классы, библиотеки, помещения для мастер-классов, специализированные музеи, лекционные залы);
- 3) развлекательно-досуговая (кафе, рестораны, помещения для проведения мероприятий, зоны общения);
- 4) музейно-демонстративная (экспозиционные залы для постоянных экспозиций), выставочные залы (для периодических выставок), фондохранилища, рабочие помещения сотрудников музея, служебные помещения);
- 5) рекреационная зона (учебные места на свежем воздухе, места для общения и отдыха);
- 6) вспомогательная (служебные и административные помещения, комнаты для переговоров).

Главные функциональные зоны — научно-исследовательская, музейно-демонстративная и учебно-познавательная. Установлено, что контекстом окружения центров может служить либо сложившаяся застройка (82 % из рассмотренных примеров), либо природная среда (18 % из рассмотренных примеров). Установлено, что здания экологической направленности позволяют всем посетителям понять важность устойчивого образования и тесно общаться с природой [16].

Учитывая потенциал городских зеленых насаждений выступать в качестве условий для укрепления здоровья, необходимо обобщить имеющиеся фактические данные, определяющие, где это возможно, основные механизмы, способствующие как негативным, так и позитивным последствиям для здоровья городских зеленых насаждений. Также необходимо обобщить существующие представления о характеристиках городских зеленых насаждений.

Существующая зависимость между объемами зеленого пространства и показателями, характеризующими здоровье человека, выражается посредством нескольких основных направлений:

- 1) повышение качества воздуха;
- 2) развитие физической активности жителей;

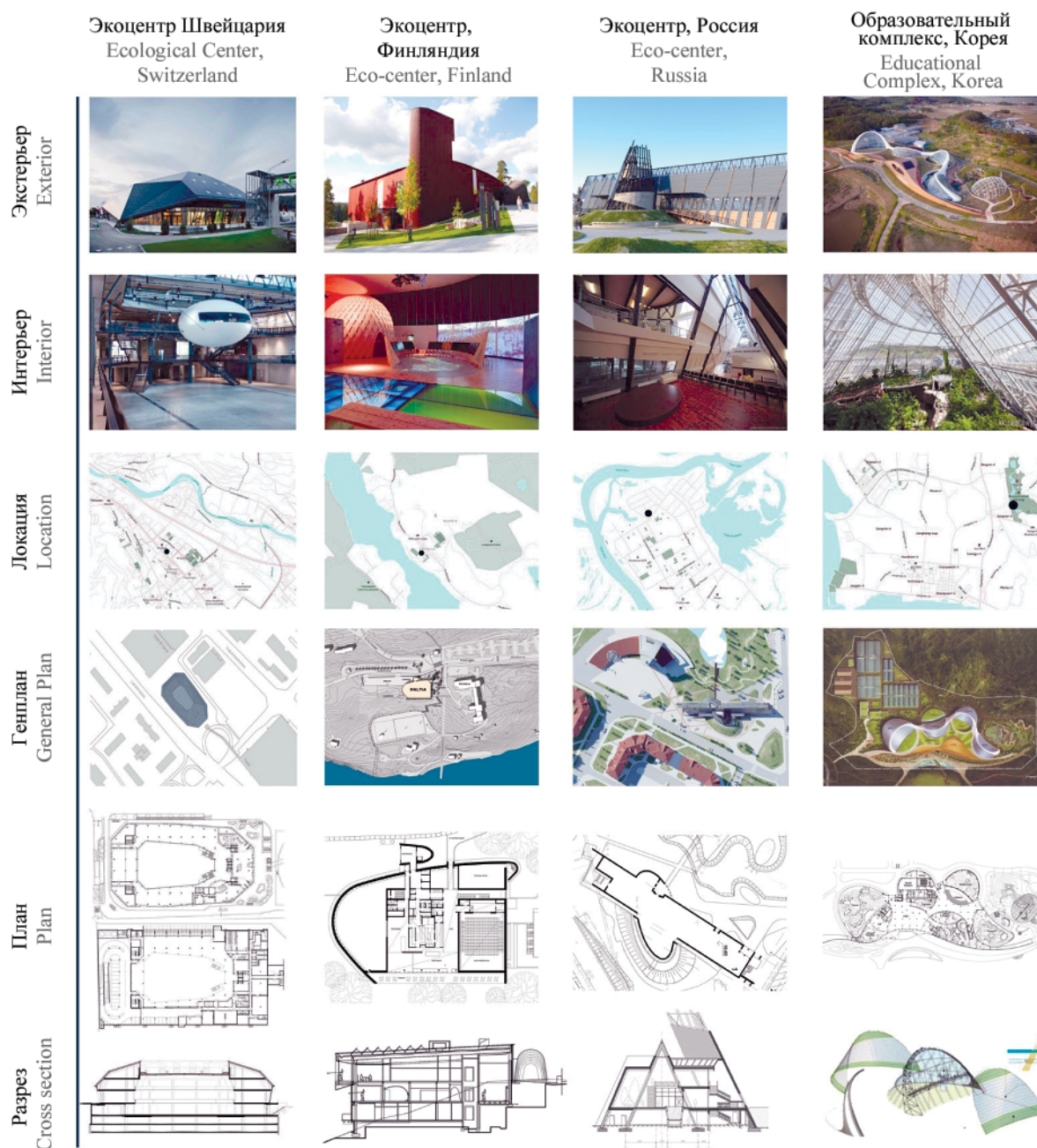


Рис. 2. Архитектурно-пространственные особенности образовательных и научных центров экологической направленности (научные центры)

Fig. 2. Architectural and spatial features of educational and scientific centers of ecological orientation (research centers)

3) снижение влияния стрессовых факторов на жизнедеятельность современного человека;

4) увеличение показателей сплоченности общества вокруг преодоления сложившихся экологических проблем.

В совокупности данные направления образуют механизм развития человеческого здоровья. При этом ряд факторов, зависящих напрямую от текущего состояния окружающей среды, выступают в качестве способа обеспечения компенсирующего эффекта от отсутствия какого-либо из вышеизложенных четырех компонентов.

На примере современных образовательных центров можно подчеркнуть, что внедрение элементов «зеленой» архитектуры, в которой процесс обучения фактически интегрирован в природу, позволяет взаимодействовать с природными элементами в их натуральном виде, что, как следствие, повышает уровень эмоционального контакта, формирует неразрывную взаимосвязь между человеком и природой. В результате долгосрочного влияния данного фактора повышается уровень физической активности посетителей данного комплекса, растут показатели психического здоровья. Подобные об-



Рис. 3. Архитектурно-пространственные особенности образовательных и научных центров экологической направленности (образовательные центры)

Fig. 3. Architectural and spatial features of educational and scientific centers of ecological orientation (educational centers)

разовательные организации можно рассматривать в качестве инновационных, что исходит из учета целого комплекса факторов при строительстве: от природного ландшафта до характерных элементов подобных территорий с применением «зеленых» крыш, вертикального озеленения [17].

В архитектурно-планировочном решении большинство рассмотренных зданий имеют этажность от двух до пяти этажей. Внутри зданий располагаются пространства для отдыха или занятий на свежем воздухе. Все здания имеют зеленую кровлю, которая служит в качестве изоляции и затенения,

а сточные воды перерабатываются для полива насаждений и обслуживания санузлов. Растения комплекса образуют единую живую систему и несут экологическую функцию — поглощение пыли, выбросов CO₂ и дождевой воды. В отделке фасадов и интерьерах присутствуют элементы из натурального дерева (разноцветные панели из массива, устойчивого поперечного бруса и др.). В объемно-планировочном решении центров учитываются новейшие требования по безопасности и доступности для маломобильных групп посетителей [18, 19].

Функционально-технологические особенности образовательных и научных центров экологической направленности

Functional and technological features of educational and scientific centers of ecological orientation

Общие данные General data	Краткое описание Short description	Применение технологий Application of technologies	Функциональное решение Functional solution
Экоцентр (энергосберегающее здание) «Экологическая арена», Швейцария Ecological Center (energy-saving building) “Ecological Arena”, Switzerland	Просветительская функция, защита окружающей среды. Расположение в структуре города Educational function, environmental protection. Location in the structure of the city	• фотоэлектрические панели; • крыша состоит из теплоизоляционных балок коробчатого сечения; • бетонное стержневое охлаждение в потолках; • фотоэлектрическая система, встроенная в крышу • photovoltaic panels; • the roof consists of box-shaped thermal insulation beams; • concrete core cooling in ceilings; • photovoltaic system built into the roof	• центр экологических компетенций; • образовательные пространства; • выставочный зал; • экскурсионное бюро; • парковочные места (подземные); • место для проведения торжественных мероприятий; • ресторан; • концертный зал; • помещения для мастер-классов • environmental competence Center; • educational spaces; • exhibition hall; • tour desk; • parking spaces (underground); • a place for celebrations; • restaurant; • concert hall; • premises for master classes
Экоцентр «Природа Халтии», Финляндия Eco-center “Nature of Haltia”, Finland	В комплексе предоставлены выставочные площади, рестораны и конференц-зал, кафе, учебные классы, научные лаборатории, офисы. Расположение на окраине города The complex provides exhibition areas, restaurants and a conference hall, cafes, classrooms, scientific laboratories, offices. Location on the outskirts of the city	• в деревянный фасад встроены экспансивные стеклянные витражи; • для обогрева используются геотермальные скважины; • для электроэнергии — солнечные батареи; • крыша здания — зеленая кровля с фотоэлектрическими панелями; • крыша состоит из коробчатых теплоизоляционных балок; • охлаждение бетонной сердцевины в потолках; • фотоэлектрическая система, встроенная в крышу • expansive glass stained glass windows are built into the wooden facade; • geothermal wells are used for heating; • for electricity — solar panels; • the roof of the building is a green roof with photovoltaic panels; • the roof consists of box-shaped thermal insulation beams; • cooling of the concrete core in the ceilings; • photovoltaic system built into the roof	• выставочный зал; • выставочные площадки; • конференц-зал; • кафе, рестораны; • образовательные пространства; • лаборатории; • помещения для мастер-классов • exhibition hall; • exhibition venues; • conference room; • cafes, restaurants; • educational spaces; • labs; • premises for master classes
Экоцентр «Нуви ат», г. Белоярский, Россия Eco-center “Nouvi at”, Beloyarsky, Russia	Комплекс помещений для администрации уникального природного парка «Нумто», функция культурного центра, добавлена музейная функция для создания экспозиции, посвященной природе края. Расположение на окраине города A complex of premises for the administration of the unique natural park “Numto”, the function of a cultural center, a museum function has been added to create an exposition dedicated to the nature of the region. Location on the outskirts of the city	• фотоэлектрические панели; • встроены экспансивные стеклянные витражи • photovoltaic panels; • expansive glass stained glass windows are built in	• выставочный зал/экспозиционные залы; • экскурсионное бюро; • помещения для мастер-классов • exhibition hall/exhibition halls; • tour desk; • premises for master classes

Общие данные General data	Краткое описание Short description	Применение технологий Application of technologies	Функциональное решение Functional solution
Образовательный комплекс «Экориум» Национального экологического института, Корея “Ecorium” Educational Complex of the National Ecological Institute, Korea	Комплекс зданий, связанных между собой теплицами, внутри которых воссозданы биомы различных климатических зон земли: субтропики, Средиземноморье, умеренный пояс и Антарктика с ее обитателями — пингвинами. Расположение на окраине города A complex of buildings connected by greenhouses, inside which biomes of various climatic zones of the earth are recreated: subtropics, Mediterranean, temperate zone and Antarctica with its inhabitants — penguins. Location on the outskirts of the city	• фотоэлектрические панели; • солнечные батареи; • наличие учебных зон на улице • photovoltaic panels; • solar panels; • availability of training areas on the street	• центр экологических компетенций; • образование; • выставочный зал; • экскурсионное бюро; • помещения для мастер-классов; • ботанические сады • environmental competence center; • education; • exhibition hall; • tour desk; • premises for master classes; • botanical gardens
Начальная школа в г. Хаслев на 550 учеников, Дания Elementary school in Haslev for 550 students, Denmark	Интегрирует обучение и воспитание детей с экоустойчивостью, являясь низкоэнергетическим зданием первого класса Integrates the education and upbringing of children with eco-sustainability, being a low-energy first-class building	• солнечные батареи; • наличие учебных зон на улице • solar panels; • availability of training areas on the street	• центр обучения и воспитания экоустойчивости (начальные классы); • учебные зоны на открытом воздухе; • игровые площадки • eco-sustainability training and education center (primary classes); • outdoor study areas; • playgrounds
Средняя школа Марселя Сембата в Соттевиле-ле-Руан, Франция Marcel Sembat High School in Sotteville-le-Rouen, France	Экологически чистая школа. Проект представляет собой расширение средней школы Eco-friendly school. The project is an extension of a secondary school	• озеленение кровель зданий; • стекло и полупрозрачный поликарбонат на фасаде • solar panels; • availability of training areas on the street	• центр обучения, в том числе для учеников со слабым здоровьем; • мастерские; • учебные помещения промышленных технологий; • учебные зоны на улице; • помещения для мастер-классов; • игровые площадки; • библиотека; • парковая зона • training center, including for students with poor health; • workshops; • industrial technology training facilities; • study areas on the street; • premises for master classes; • playgrounds; • library; • park area
Зеленая школа, Бали Green School, Bali	Частный международный детский сад и старшая школа. Школа состоит из четырех учебных кварталов — ранние годы, начальная школа, средняя школа и старшая школа. Расположение в центре города Private international kindergarten and high school. The school consists of four academic blocks — early years, elementary school, middle school and high school. Location in the city center	• вся конструкция из экологического бамбука; • система выработки энергии; • солнечные батареи; • мини-гидрогенераторы • the whole structure is made of ecological bamboo; • energy generation system; • solar panels; • mini hydro generators	• центр обучения и воспитания экоустойчивости; • наличие учебных зон на открытом воздухе; • спортивные залы; • общежитие; • кафе • center for training and education of environmental sustainability; • availability of outdoor study areas; • gyms; • hostel; • cafe

Окончание табл. / End of the Table

Общие данные General data	Краткое описание Short description	Применение технологий Application of technologies	Функциональное решение Functional solution
Начальная школа, Франция Elementary school, France	Пример интеграции учебных и рекреационных функций. Расположение в центре города An example of the integration of educational and recreational functions. Location in the city center	• озеленение кровель зданий; • фасады состоят из панелей из натурального дерева; • учебный атриум с прозрачной стеной, куда попадают солнечные лучи • greening of roofs of buildings; • the facades consist of panels made of natural wood; • an educational atrium with a transparent wall where the sun's rays fall	• центр обучения и воспитания экоустойчивости; • спортивные залы; • рекреационная зона; • библиотека; • игровые площадки • center for training and education of environmental sustainability; • gyms; • recreational area; • library; • playgrounds
Школа искусств, дизайна и средств массовой информации, Сингапур School of Art, Design and Media, Singapore	Органическая форма, вписанная в структуру ландшафта, и применение высоких технологий символизируют творческий характер здания школы искусств, дизайна и средств массовой информации в Сингапуре The organic form, inscribed in the structure of the landscape and the usage of high technology symbolize the creative nature of the building of the School of Art, Design and Media in Singapore	• стеклянный фасад поглощает солнечную и тепловую нагрузку здания; • озеленение кровель зданий; • система сбора дождевой воды; • использование экологического освещения • the glass facade absorbs the solar and thermal load of the building; • greening of roofs of buildings; • rainwater collection system; • the use of environmental lighting	• обучение; • спортивные залы; • рекреационная зона; • библиотека • training; • gyms; • recreational area; • library
Спиральный детский сад с фермой, Вьетнам Spiral kindergarten with farm, Vietnam	Экологичный детский сад, расположенный рядом с большой фабрикой обуви и рассчитанный на 500 детей работников завода. На территории находится собственная плантация, где выращивают овощи Eco-friendly kindergarten, located next to a large shoe factory and designed for 500 children of factory workers. On the territory there is a private plantation where vegetables are grown	• сельскохозяйственные участки на зеленой кровле; • озеленение кровель зданий; • естественная вентиляция помещений; • наличие учебных зон на улице • agricultural plots on a green roof; • greening of roofs of buildings; • natural ventilation of the premises; • availability of training areas on the street	• центр обучения и воспитания экоустойчивости; • спортивные залы; • рекреационная зона; • библиотека; • игровые площадки • center for training and education of environmental sustainability; • gyms; • recreational area; • library; • playgrounds
Штаб-квартира Международного олимпийского комитета (МОК), Швейцария Headquarters of the International Olympic Committee (IOC), Switzerland	Штаб-квартира Международного олимпийского комитета в Лозанне. 95 % материалов во время строительства были использованы повторно или переработаны, в том числе бетон, ставший основой фундамента нового здания. 95 % отходов, оставшихся при строительстве Олимпийского дома, также отправились в переработку. Крыша здания выполнена в виде голубя мира и снабжена солнечными панелями The headquarters of the International Olympic Committee in Lausanne. 95 % of the materials used in the construction were reused or recycled, including concrete, which became the foundation of the foundation of the new building. 95 % of the waste remaining during the construction of the Olympic House was also recycled. The roof of the building is made in the form of a dove of peace and is equipped with solar panels	• стеклянный фасад поглощает солнечную и тепловую нагрузку здания; • озеленение кровель зданий; • система сбора дождевой воды; • лампы светодиодные, за потреблением энергии следят датчики; • принцип теплового насоса • the glass facade absorbs the solar and thermal load of the building; • greening of roofs of buildings; • rainwater collection system; • LED lamps, sensors monitor energy consumption; • the principle of the heat pump	• конференц-центр; • выставочное помещение; • кафетерий; • спортивный зал; • реарационная зона; • подземная парковка • the glass facade absorbs the solar and thermal load of the building; • greening of roofs of buildings; • rainwater collection system; • LED lamps, sensors monitor energy consumption; • the principle of the heat pump

Следует выделить четыре типа озеленения зданий рассмотренных научных и образовательных комплексов:

- 1) на фасаде;
- 2) на кровле;
- 3) в интерьере;

4) во внутреннем пространстве (двор, сад) (рис. 4).

Выявлены основные принципы проектирования «зеленых» пространств в зданиях экологической направленности научных и образовательных центров (рис. 5).

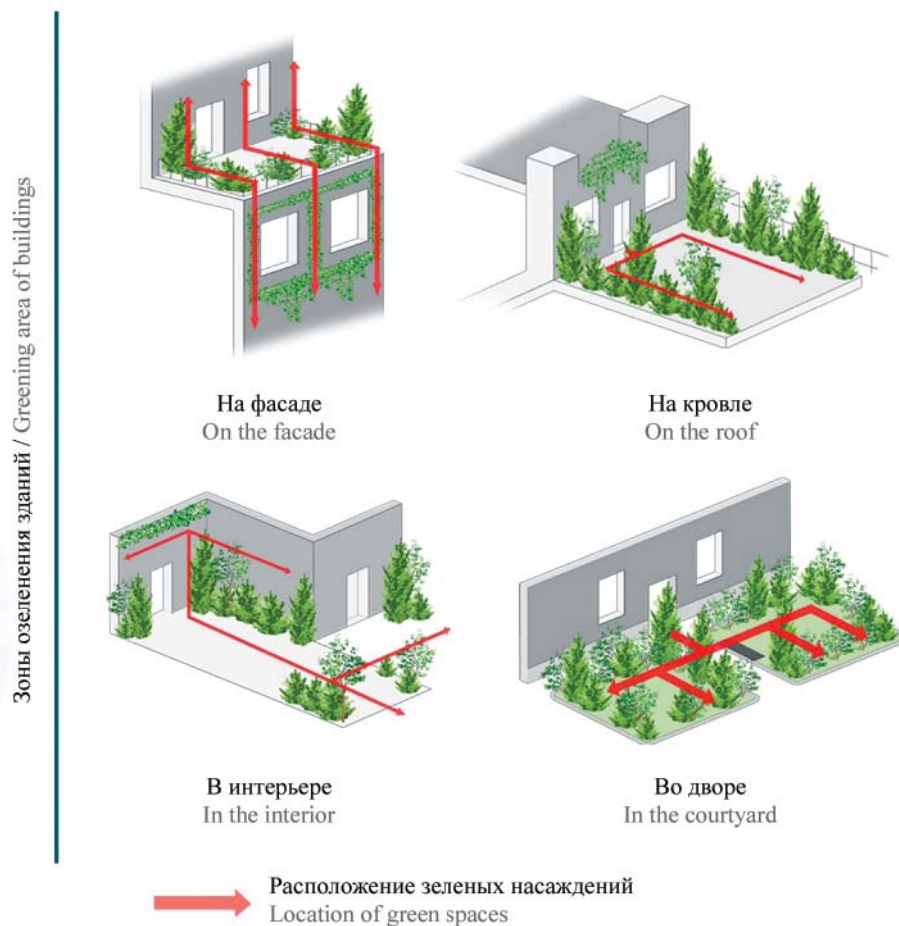


Рис. 4. Схемы озеленения научно-образовательных комплексов

Fig. 4. Landscaping schemes of scientific and educational complexes



Рис. 5. Основные принципы проектирования «зеленых» пространств в зданиях экологической направленности научных и образовательных центров

Fig. 5. Basic principles of designing “green” spaces in buildings of ecological orientation of scientific and educational centers

Выявлены основные типы планировочных схем научно-образовательных комплексов. Их можно разделить на три типа: зальный, ячейковый и ячейково-зальный (или смешанный) [20]. В ходе анализа существующей практики установлен еще один тип планировочной схемы, которая ранее не была ранее официально классифицирована — биоморфная или биоморфологическая, выполняемая на основе форм живых организмов. Ее отличительной особенностью является наличие в функционально-планировочном решении элементов ядра.

Особым отличием обычных многофункциональных центров от образовательных учреждений экологической направленности является воплощение в их архитектуре технологических решений, отвечающих принципам устойчивого развития [21–24]. К ним относятся:

- 1) геотермальные скважины и тепловые насосы для обогрева в холодный период и летом для охлаждения;
- 2) фотоэлектрические панели или ветряные мельницы для получения энергии;
- 3) зеленая кровля для обеспечения эффективности теплоснабжения, защиты здания от воздействия ветра, атмосферных осадков и температурных колебаний служит в качестве дополнительного источника кислорода и места отдыха;
- 4) система сбора дождевой воды для очистки и использования;
- 5) применение энергоэффективных и экологических окон;
- 6) использование дерева во внутренней и внешней отделке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании анализа экологической ситуации Краснодарского края выбрано место размещения научно-образовательного центра экологической направленности — Имеретинская низменность, г. Сочи. Были учтены такие факторы, как экологическая обстановка города и района, физико-географические условия, климат, инженерно-геологические изыскания, антропогенная нагрузка, функциональ-

ное зонирование территории в радиусе 10 км, транспортная доступность, пропускная способность территории, возможность размещения и эксплуатации возобновляемых источников энергии и других современных технологий.

В основу концептуального проектирования научно-образовательного центра экологической направленности легли следующие принципы: экологическая устойчивость, социальная эффективность, эстетичность, культурно-досуговая и образовательная ценность, инновационность. Предложенный проект предполагает формирование комплексной модели обеспечения «зеленой» устойчивости, включающей учет климатических особенностей. Обучающиеся смогут получать все необходимые экологические навыки на ранних этапах развития [25].

Архитектурная концепция центра заключается в создании современного инновационного научно-образовательного сооружения с рекреационной зоной. Новое общественное здание расширит публичное пространство города, увеличит привлекательность, заинтересованность людей в бережном отношении к природе. У туристов и местных жителей появится возможность получения полезных знаний по экологии, биологии, ботаники, химии и другим предметам. Комплекс может стать центром экологического мониторинга и восстановления экосистемы Черного моря (рис. 6) [26].

Была разработана биоморфологическая планировочная структура центра, основа построения которой заложена природой. За биоаналог принят живой организм — инфузория-туфелька, в центре которого ядро, состоящее из главного вестибюля и распределительной зоны (рис. 7, 8) [27].

Проектом предусмотрены пять главных функциональных зон помещений центра со следующим процентным соотношением по площадям:

- 1) научно-исследовательская — 25 %;
- 2) учебно-познавательная — 50 %;
- 3) музейно-демонстративная — 10 %;
- 4) развлекательно-досуговая — 5 %;
- 5) вспомогательная — 10 %.

Научно-исследовательская зона включает научно-исследовательские лаборатории, мастерские,



Рис. 6. Общий вид научно-образовательного комплекса экологической направленности в г. Сочи
Fig. 6. General view of the scientific and educational complex of ecological orientation in Sochi



Рис. 7. Планировочное решение научно-образовательного комплекса экологической направленности в г. Сочи

Fig. 7. Planning solution of the scientific and educational complex of ecological orientation in Sochi



Рис. 8. Архитектурная концепция научно-образовательного комплекса экологической направленности в г. Сочи. Фасады

Fig. 8. Architectural concept of the scientific and educational complex of ecological orientation in Sochi. Facades

слайдотеки, компьютерные помещения, библиотеку. В данной зоне могут быть расположены некоторые административные, а также вспомогательные и технические помещения. Здесь решаются следующие задачи: проведение лабораторных анализов проб воды, воздуха, почв. Осуществляется экологический мониторинг г. Сочи [28].

Учебно-познавательная зона создана с целью обучения населения всех возрастов экологической грамоте. Данная функция является основной. В структуре функциональной зоны расположены учебные пространства, лекционные и мультимедийные залы. Основные функции данной группы помещений — обучение младших и старших возрастных групп посетителей, демонстрация экспозиций, проведение лекций, мастер-классов и т.д. [29].

Музейно-демонстративная зона включает: экспозиционные залы для постоянных экспозиций, выставочные залы для периодических выставок, фондохранилища, рабочие помещения сотрудников музея, служебные помещения.

Развлекательно-досуговая зона. Здесь размещена зона общения, помещение для проведения торжественных мероприятий, кафе здорового питания, сувенирные, помещения для отдыха и рекреация.

Вспомогательная зона. В нее входят служебные и административные помещения, гардеробные, с/у, инвентарные, технические помещения (сортировка и хранение отходов), технические этажи, где располагаются инженерные системы и оборудование для поддержания и эксплуатации солнечных панелей и др.

Проектом предусмотрено снижение объема потребляемой энергии комплекса внедрением системы повторного использования воздуха. Формирование микроклимата в помещении достигается зонированием помещений с последующим внедрением систем независимого поступления воздуха с использованием кондиционеров. В проекте предусмотрена современная система геотермальных скважин с тепловыми насосами. Она позволяет экономить получаемую энергию, необходимую для обогрева и охлаждения здания, примерно в пятикратном размере. В здании применяется скрытая система сбора, очистки и подачи дождевой воды. Данная система позволяет получить почти полную автономность для обеспечения нужд здания как технической, так и питьевой водой. Внедрение же солнечных панелей в здании предполагает их расположение на кровле и в некоторых местах на стенах здания. Система может быть адаптирована под однофазное напряжение (220 В). Представленный механизм позволяет получать экологически чистую энергию, что к тому же позволяет экономить на электропотреблении из внешних сетей. Кроме того, в схему сооружения внедряется система автоматизированного паркинга. Она предполагает возможность размещения в подземном пространстве отдельного сооружения с системой, контролирующей движение автомобилей к местам парковки. Проектом исключены системы выезда и въезда в здание, пандусы, площадки для разворота, лифты и др. дополнительные элементы. Автопарковка вынесена на периферийную часть участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Повышенный уровень загрязнения Краснодарского края обусловлен выбросами в атмосферу вредных веществ автомобильным и авиационным транспортом, производствами, неудовлетворительным состоянием очистных сооружений, вредным воздействием ТЭС и ТЭЦ. Отсутствуют современные системы по очистке и фильтрации выбросов в атмосферу и сбросу сточных вод, малоразвиты современные предприятия с использованием экосистем. Как следствие — необходимость развития экологических научно-образовательных центров.

Предложенные принципы формирования центров с учетом смешанной функциональности позволят решить разнообразные задачи: создание учебного процесса с экологическим уклоном для привлечения внимания населения к различным проблемам с обучением методам и возможностям решений задач, проведение лабораторных анализов с целью изучения экологической обстановки в регионе с возможностью отбора проб и анализом проблем и методов их решений.

Анализ зарубежного и российского опыта проектирования центров экологической направленности позволил установить общие черты по функциональному построению зданий с элементами устойчивой архитектуры, применению современных систем сбережения энергоресурсов и воды. В условиях современных требований к зданиям используются новейшие и перспективные технологические решения, такие как фотоэлектрические панели, геотермальные скважины с системой теплового насоса, водосбор дождевой воды с системой ее очистки, современные системы организации климата в здании.

Малочисленность комплексов экологической направленности подтверждается на уровне мировой практики, что напрямую говорит о востребованности такого формата учреждений. Изучение и анализ опыта проектирования подобных комплексов дает понимание о необходимости их всестороннего комплексного развития в условиях современной архитектуры с симбиозом инновационных технологий. Предложенная концепция научно-образовательного центра для г. Сочи может быть использована в качестве аналога при строительстве в других городах России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Остафийчук Ю.А. Инструменты развития и повышения конкурентоспособности территории Краснодарского края // Молодой ученый. 2018. № 2 (188). С. 69–71.
2. Соколова Т.Г., Ярмонова Е.Н. Основные направления преодоления экологических проблем Краснодарского края // Развитие природоохранной системы и экологии города : мат. регион. науч.-практ. мол. интернет-конф. Армавир, 2017. С. 203–207.
3. Симко Н.С., Дюндина О.С. Влияние человеческой деятельности на ОПС на примере Южного федерального округа // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2011. № 5–1. С. 47–49.
4. Боброва О.Ю. Современное состояние, проблемы и перспективы развития нефтяной и газовой промышленности Краснодарского края // Молодой ученый. 2013. № 8. С. 158–162.
5. Казачинский В.П., Маймула Г.В. Основные экологические проблемы рекреационно-туристских зон Кубани // Научный вестник Южного института менеджмента. 2014. № 3. С. 58–62.
6. Дегодя Е.Ю., Мальцев Е.В. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. № 6 (1). С. 34–37.
7. Лукашевич О.А., Хамдиев И.Ю., Васильев М.В. Негативное экологическое влияние аэропортов на окружающую местность // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований : сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Саратов, 2020. С. 16–20.
8. Иванова А.Р. Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 365. С. 5–14.
9. Назаревский Д.А., Мордасова А.А., Елисева Н.В. Особо охраняемые природные территории Краснодарского края // Естественно-гуманитарные исследования. 2017. № 16 (2). С. 31–35.
10. Акатов В.В., Акатова Т.В., Бибин А.Р. Природные комплексы Имеретинской низменности: биологическое разнообразие, созологическая значимость, рекомендации по сохранению. Краснодар : ООО «Копи-Принт», 2009. 93 с.
11. Кулагин А.Ю., Косихина Ю.К. Зеленые насаждения для поддержания здорового образа жизни // Молодой ученый. 2020. № 20 (310). С. 472–474.
12. Сухинина Е.А. Об экологических нормах в архитектурно-градостроительном проектировании // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 1 (162). С. 211–217.

13. Османова М.А. Применение зеленых стандартов в России: проблемы и перспективы // Теория и практика современной науки. 2019. № 12 (54). С. 335–341.
14. Popov A.V. Ecological optimization of the architectural environment of higher education institutions in Moscow. The use of phyto-metal structures // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 869–870. Pp. 162–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.869-870.162
15. Иванова А.П., Крадин Н. Объекты образования на Дальнем Востоке. Историко-архитектурный очерк дальневосточных учебных заведений // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 154–157. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>
16. Григорьева Е.И. Особенности развития архитектуры школьных зданий в исторической части Иркутска и его новых районах // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 126–131. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>
17. Popov A.V., Melnikova I.B., Slepchenko A.N. The main historical development stages of accessible green roofs in the urban environment // Amazonia Investiga. 2019. Vol. 8 (23). Pp. 406–418.
18. Melnikova E., Lepert M., Popov A., Sorokoumova T. Adapting urban areas for people with limited mobility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701033
19. Лидин К.Л., Григорьева Е.И. Министры, архитекторы и школьный травматизм // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 118–120. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>
20. Popov A.V., Syrova O.I. University campuses in Russia: architectural and urban development typology // Nexa Revista Científica. 2021. Vol. 34 (06). Pp. 1826–1839. DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13172
21. Finogenov A.I., Popov A.V. Problems of architectural and space-planning design of urban facilities for industrial and utility purposes (By the example of Moscow) // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 8. Issue 6. Pp. 975–979. DOI: 10.35940/ijeat.F8260.088619
22. Bondarev B.A., Sychev A.Y., Kosta A.A. Research of fiberglass polymer concrete switch bars on endurance under cyclic loading // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 321–327. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_43
23. Korneeva A.O., Bondarev B.A., Kosta A.A., Meshcheryakov A.A., Bondarev A.B. Optimization of mixture compound for additive technologies // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 282. Pp. 469–476. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_44
24. Timina A., Yanova R., Popov A., Sorokoumova T. Modern translucent materials and their impact on architectural forming // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701035
25. Чеботарёва Т.Ю. Детские сады // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 122–126. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>
26. Литвинов Б.Т. Наука и образование в городе // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 103–105. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>
27. Kosta A.A. Formation of the architecture of developing business centers in special economic zones with the use of the bio-similar modeling principle // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 869–870. Pp. 162–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1107
28. Finogenov A.I., Popov A.V. Concept of planning development of coastal resort settlements under conditions of complex relief // Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. Vol. 10 (1). Pp. 135–139. DOI: 10.14505/jemt.10.1(33).13
29. Теплякова И.А. Школа искусств в Академгородке Иркутска // Проект Байкал. 2008. № 18. С. 132–135. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88>

Поступила в редакцию 20 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Антон Андреевич Коста** — кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 663481, Scopus: 57222406509, ResearcherID: ADI-4375-2022, ORCID: 0000-0002-4548-8359; KostaAA@mgsu.ru;

Анастасия Александровна Семина — ведущий архитектор; **Монолитное строительное управление-1 (МСУ-1)**; 105082, г. Москва, ул. Ольховская, д. 49; An.seminaa@gmail.com.

Вклад авторов:

Коста А.А. — научное руководство, научное редактирование текста.

Семина А.А. — идея, сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ostafiychuk Yu.A. Tools for the development and improvement of the competitiveness of the Krasnodar territory. *Young Scientist*. 2018; 2:69-71. (rus.).
2. Sokolova T.G., Yarmonova E.N. The main directions of overcoming the environmental problems of the Krasnodar Territory. *Development of the Environmental Protection System and Ecology of the City : materials of the regional scientific and practical youth Internet conference*. Armavir, 2017; 203-207. (rus.).
3. Simko N.S., Dyundina O.S. The impact of human activity on OPS on the example of the Southern Federal District. *Intellectual Potential of the XXI Century: Stages of Cognition*. 2011; 5-1:47-49. (rus.).
4. Bobrova O.Yu. The current state, problems and prospects of development of the oil and gas industry of the Krasnodar Territory. *Young Scientist*. 2013; 8:158-162. (rus.).
5. Kazachinsky V.P., Maymula G.V. The main environmental problems of recreation and tourist zones of Kuban. *Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management*. 2014; 3:58-62. (rus.).
6. Degodya E.Yu., Maltsev E.V. The impact of road transport on the environment. *Modern Problems of the Transport Complex of Russia*. 2016; 6(1): 34-37. (rus.).
7. Lukashevich O.A., Khamdiev I.Yu., Vasiliev M.V. The negative environmental impact of airports on the surrounding area. *New Impulses of Development: Issues of Scientific Research : collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference: in 2 parts*. Saratov, 2020; 16-20. (rus.).
8. Ivanova A.R. The impact of aviation on the environment and measures to mitigate the negative impact. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2017; 365:5-14. (rus.).
9. Nazarevsky D.A., Mordasova A.A., Eliseeva N.V. Specially protected natural territories of the Krasnodar Territory. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2017; 16(2):31-35. (rus.).
10. Akatov V.V., Akatova T.V., Bibin A.R. *Imereti lowland: biological diversity, zoological significance, recommendations for conservation*. Krasnodar, Copy-Print LLC, 2009; 93. (rus.).
11. Kulagin A.Yu., Koshikhina Yu.K. Green spaces for maintaining a healthy lifestyle. *Young Scientist*. 2020; 20(310):472-474. (rus.).
12. Sukhinina E.A. About environmental standards in architectural urban design. *Bulletin of the Orenburg State University*. 2014; 1(162):211-217. (rus.).
13. Osmanov M.A. Application of green standards in Russia: challenges and prospects. *Theory and Practice of Modern Science*. 2019; 12(54):335-341. (rus.).
14. Popov A.V. Ecological optimization of the architectural environment of higher education institutions in Moscow. The use of phyto-metal structures. *Advanced Materials Research*. 2014; 869-870:162-166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.869-870.162
15. Ivanova A.P. Educational facilities in the Far East. Historical and architectural sketch of Far Eastern educational institutions. *The Baikal Project*. 2008; 18:154-157. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).
16. Grigorieva E.I. Features of the development of the architecture of school buildings in the historical part of Irkutsk and its new districts. *The Baikal Project*. 2008; 18:126-131. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).
17. Popov A.V., Melnikova I.B., Slepchenko A.N. The main historical development stages of accessible green roofs in the urban environment. *Amazonia Investiga*. 2019; 8(23):406-418.
18. Melnikova E., Lepert M., Popov A., Sorokoyanova T. Adapting urban areas for people with limited mobility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701033
19. Lidin K.L., Grigorieva E.I. Ministers, architects and school injuries. *The Baikal Project*. 2008; 18:118-120. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).
20. Popov A.V., Syrova O.I. University campuses in Russia: architectural and urban development typology. *Nexo Revista Cientifica*. 2021; 34(06):1826-1839. DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13172
21. Finogenov A.I., Popov A.V. Problems of architectural and space-planning design of urban facilities for industrial and utility purposes (By the example of Moscow). *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(6):975-979. DOI: 10.35940/ijeat.F8260.088619
22. Bondarev B.A., Sychev A.Y., Kosta A.A. Research of fiberglass polymer concrete switch bars on endurance under cyclic loading. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 147:321-327. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_43
23. Korneeva A.O., Bondarev B.A., Kosta A.A., Meshcheryakov A.A., Bondarev A.B. Optimization of mixture compound for additive technologies. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 282:469-476. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_44
24. Timina A., Yanova R., Popov A., Sorokoumova T. Modern translucent materials and their impact on architectural forming. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701035
25. Chebotareva T.Yu. Kindergartens. *The Baikal Project*. 2008; 18:122-126. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).
26. Litvinov B.T. Science and education in the city. *The Baikal Project*. 2008; 18:103-105. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).

27. Kosta A.A. Formation of the architecture of developing business centers in special economic zones with the use of the bio-similar modeling principle. *Advanced Materials Research*. 2015; 869-870:162-166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1107

28. Finogenov A.I., Popov A.V. Concept of planning development of coastal resort settlements under

conditions of complex relief. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2019; 10(1):135-139. DOI: 10.14505/jemt.10.1(33).13

29. Teplyakova I.A. Art School in Akademgorodok Irkutsk. *The Baikal Project*. 2008; 18:132-135. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/issue/view/18/88> (rus.).

Received February 20, 2023.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Anton A. Kosta** — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 663481, Scopus: 57222406509, ResearcherID: ADI-4375-2022, ORCID: 0000-0002-4548-8359; KostaAA@mgsu.ru;

Anastasia A. Semina — Leading Architect; **Monolithic Construction Management-1**; 49 Olkhovskaya st., Moscow, 105082, Russian Federation; An.seminaa@gmail.com.

Contribution of the authors:

Anton A. Kosta — scientific text editing, author supervision.

Anastasia A. Semina — idea, data gathering and processing, writing of the article, writing the source text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04: 624.012.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532

Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением

Александр Михайлович Бударин¹, Георгий Игоревич Ремпель¹,
Алексей Александрович Камзолкин, Владимир Николаевич Алехин²

¹ Институт Гидропроект; г. Москва, Россия;

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);
г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Бетон, будучи неотъемлемой частью современного строительства, является сложным нелинейным материалом. Прочность и деформативность бетона в значительной степени зависят от его напряженно-деформированного состояния (НДС). Подобное поведение обусловлено сложной и крайне неоднородной структурой материала. Среди бетонных и железобетонных конструкций вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений присутствует большое количество элементов, работающих в условиях трехосного НДС. В настоящее время в Федеральном законе № 384-ФЗ существуют высокие требования к расчетным моделям зданий и сооружений, включающие необходимость учета физической нелинейности и пластических свойств материалов. В качестве инструмента, позволяющего описывать физически нелинейное поведение бетона в условиях сложного НДС, а также учитывающего перечисленные выше требования, может выступать феноменологическая модель материала, построенная на основе теории пластического течения. Большая часть моделей бетона, реализованная в «тяжелых» конечно-элементных комплексах, ориентированных на универсальное применение, обладает рядом недостатков, затрудняющих использование моделей. К основным недостаткам можно отнести: существенное отклонение поверхности прочности/нагрузки от результатов опытных данных; некорректно построенную зависимость между деформативностью материала и его напряженным состоянием; отсутствие учета эффектов дилатации и контракции; присутствие значительного количества зон сингулярностей в поверхности нагружения; отсутствие алгоритмов получения параметров, используемых для описания поведения материала. Целью данной работы является разработка модели бетона, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение материала. Модель должна учитывать основные эффекты, характеризующие НДС материала (эффекты дилатации, контракции), отражать разницу в поведении бетона при сжатии и растяжении и обладать минимальным количеством зон сингулярности. Также должны быть представлены алгоритмы для получения всех параметров модели материала.

Материалы и методы. В качестве основы используются результаты анализа и систематического обобщения данных, полученных из отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам теории пластичности бетонных и железобетонных конструкций.

Результаты. Модель реализована в программном конечно-элементном комплексе ANSYS, позволяющем использовать пользовательские модели материала. Проведено сравнение результатов лабораторных испытаний, выполненных для бетонных и железобетонных образцов при разных видах НДС, с результатами численного моделирования.

Выводы. Представленная деформационно-прочностная модель бетона дает возможность с достаточной точностью моделировать поведение материала при разных видах НДС в рамках статического простого кратковременного нагружения с учетом физической нелинейности материала, учитывая различное поведение при сжатии и растяжении, зависимость деформативности материала от вида НДС, эффекты контракции и дилатации. Поверхность нагружения модели содержит единственную зону сингулярности. Представлены алгоритмы получения всех параметров, необходимых для использования модели материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, железобетон, теория пластического течения, деформационная модель, дилатация, контракция, неассоциированный закон пластического течения, двойное упрочнение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бударин А.М., Ремпель Г.И., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 517–532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Бударин, alex.budarin01@gmail.com.

Stress-strain concrete model with double independent reinforcement

Alexander M. Budarin¹, Georgy I. Rempel¹, Alexey A. Kamzolkyn,
Vladimir N. Alekhin²

¹ Hydroproject; Moscow, Russian Federation;

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU);
Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Being an integral part of the modern construction, concrete is a complex nonlinear material. Concrete strength and deformability depend largely on its stress-strain state. Such behavior is due to the complex and highly heterogeneous structure of the material. Among concrete and reinforced concrete structures of newly constructed and reconstructed buildings and structures, there are a large number of elements working in the conditions of the triaxial stress-strain state. Currently, there are high requirements in Federal Law No. 384-FZ for the calculation models of buildings and structures, including physical nonlinearity and plastic properties of materials. A phenomenological material model based on the plastic flow theory can serve as a tool that allows describing the physically nonlinear behavior of concrete under complex stress-strain conditions, as well as taking into account the above-mentioned requirements. Most models of concrete models implemented in "heavy" finite-element complexes oriented to universal application have a number of drawbacks that hinder the use of models. The main drawbacks include significant deviation of the strength/loading surface from the results of experimental data, incorrectly constructed dependence between material deformability and its stress state, no account of dilation and contraction, the presence of a significant number of singularity zones in the loading surface, the lack of algorithms for obtaining parameters used to describe the material behavior. The purpose of this work is to develop a model of concrete that can accurately describe the behavior of the material. Moreover, the model has to take into account main effects characterizing the stress-strain state of the material (dilation, contraction), it has to reflect the different behavior of the concrete under compression and tension and has to have a minimum number of singularity zones. Algorithms for obtaining all material model parameters should also be provided.

Materials and methods. The results of analysis and systematic generalization of the data obtained from domestic and foreign sources on the theory of plasticity, concrete and reinforced concrete structures are used as the basis.

Results. The model is implemented in the finite-element software package ANSYS which allows using the user-defined models of the material. The comparison of the laboratory tests results carried out for the concrete and reinforced concrete samples under different stress-strain states with the results of numerical modelling.

Conclusions. The stress-strain model of concrete presented in the paper allows rather accurate modelling of behavior of material under different types of stress-strain conditions in the framework of static simple short-term loading taking into account physical non-linearity of the material, considering different behavior under compression and tension, dependence of deformability of material on the type of stress-strain state, the effects of contraction and dilatation. The loading surface of the model contains a single singularity zone. The algorithms for obtaining all the parameters required for the material model are presented.

KEYWORDS: concrete, reinforced concrete, plastic flow theory, deformation model, dilation, contraction, unassociated law of plastic flow, double hardening

FOR CITATION: Budarin A.M., Rempel G.I., Kamzolkyn A.A., Alekhin V.N. Stress-strain concrete model with double independent reinforcement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):517-532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532 (rus.).

Corresponding author: Alexander M. Budarin, alex.budarin01@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон, будучи неотъемлемой частью современного строительства, является сложным нелинейным материалом. Прочность и деформативность бетона в значительной степени зависят от его напряженно-деформированного состояния. Подобное поведение обусловлено сложной и крайне неоднородной структурой материала. Среди бетонных и железобетонных конструкций вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений присутствует большое количество элементов, работающих в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. К подобным конструкциям можно отнести: массивные части гидротехнических сооружений и атомных станций, элементы, имеющие несимметричное сечение, узлы сопряжения вертикальных и плитных железобетонных конструкций

и т.д. Согласно требованиям Федерального закона РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»¹, расчетные модели строительных конструкций, кроме всего прочего, должны учитывать физическую нелинейность, а также пластические свойства материалов. В качестве универсального инструмента, позволяющего моделировать поведение конструкций с учетом сложного напряженно-деформированного состояния и учитывающего перечисленные выше требования, может выступать модель бетона на основе теории пластического течения. В качестве расчетной среды для численного моделирования выступают «тяжелые» вычислительные комплексы (Ansys, Abaqus, Nastran и т.д.). Подобные комплексы обладают широкими

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ.

вычислительными возможностями, ориентированы на универсальное использование и позволяют создавать пользовательские модели материалов. Значительная часть моделей бетона, реализованных в подобных конечно-элементных комплексах, имеет ряд недостатков, значительно усложняющих применение моделей. К подобным недостаткам можно отнести:

- существенное отклонение поверхности прочности/нагружения от результатов опытных данных за пределами областей «простых» видов напряженного состояния (одноосное сжатие, двухосное сжатие, одноосное растяжение и т.д.). Как правило, подобное отклонение приводит к завышению реальной несущей способности материала;
- некорректно построенная зависимость между деформативностью материала и его напряженным состоянием (степенью гидростатического обжатия и углом Лодэ/подобия) [1];
- отсутствие учета эффектов дилатации (увеличение объема бетона вследствие накопления микротрещин и повреждений) [2] и контракции (уменьшение объема материала вследствие разрушения пор) [3], характеризующих напряженно-деформированное состояние материала;
- присутствие значительного количества зон сингулярностей в поверхности нагружения, ухудшающих математическую стабильность модели и точность описания поведения материала;
- отсутствие алгоритмов получения параметров, используемых для описания модели материала.

Таким образом, целью данной работы является разработка модели бетона, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение материала. Модель должна учитывать основные эффекты, характеризующие напряженно-деформированное состояние материала (эффекты дилатации, контракции), отражать разницу в поведении бетона при сжатии и растяжении и обладать минимальным количеством зон сингулярности. Кроме того, должны быть представлены алгоритмы для получения всех параметров модели материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве поверхности нагружения модели используется поверхность Менетри – Вильяма [4], модифицированная авторами путем добавления шатра сжатия. Поверхность имеет единственную зону сингулярности, находящуюся в вершине поверхности ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$). Девиаторные сечения поверхности, соответствующие разным степеням гидростатического обжатия, не обладают аффинным подобием. Поверхность нагружения изображена на рис. 1.

Модель определена в цилиндрических координатах Хейга – Вестергаарда: гидростатический инвариант p (1), абсолютное значение которого равно

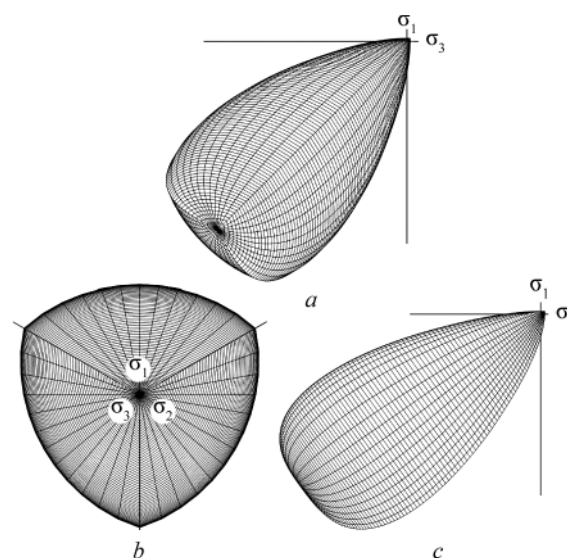


Рис. 1. Поверхность нагружения модели: а — вид на плоскость $\sigma_1 - \sigma_3$; б — вид на девиаторную плоскость; с — вид на плоскость $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_3$

Fig. 1. Loading surface of the model: а — plane view $\sigma_1 - \sigma_3$; б — deviatoric plane view; с — view on plane $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_3$

норме шарового тензора напряжений, девиаторный инвариант q (2), численно равный норме девиатора тензора напряжений, и угол подобия θ (3), находящийся в диапазоне от 0 до 60 градусов:

$$p = \frac{I_1}{\sqrt{3}}; \quad (1)$$

$$q = \sqrt{2 \cdot J_2}; \quad (2)$$

$$\cos(3 \cdot \theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}}. \quad (3)$$

Модифицированное уравнение поверхности нагружения является квадратичной версией уравнения Менетри – Вильяма и представлено формулой (4). Квадратичная функция (4) имеет «отражение» в области трехосного растяжения (рис. 2), что создает ошибочную мнимую упругую область.

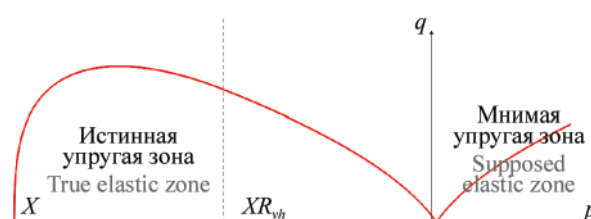


Рис. 2. Меридиальное сечение функции (4)

Fig. 2. Meridional section of function (4)

Для решения вышеуказанной проблемы для точек с положительным значением координаты p в качестве уравнения поверхности нагружения необходимо использовать формулу (5):

$$f = \left(\left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + c_s \cdot c_h \cdot m \cdot \frac{q}{\sqrt{6} \cdot R_b} \cdot r(e, \theta) \right)^2 - f_{com}(p) \cdot \left(c_s^2 \cdot c_h - c_s \cdot c_h \cdot m \cdot \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right)^2; \quad (4)$$

$$f = \left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + c_s \cdot c_h \cdot m \times \left(\frac{q}{\sqrt{6} \cdot R_b} \cdot r(e, \theta) + \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right) - c_s^2 \cdot c_h, \quad (5)$$

где R_b — предел прочности бетона на одноосное сжатие; $f_{com}(p)$ — понижающая функция, описывающая шатер сжатия (8); c_s, c_h — параметры девиаторного упрочнения и разупрочнения, отвечающие за девиаторную эволюцию поверхности нагружения.

$$R_{2b} = \left(1,2 - \frac{R_b}{1000} \right) \cdot R_b; \quad (6)$$

$$R_{vh} = \frac{1}{4,46 \cdot \exp\left(-\frac{R_b}{11,52}\right) + 1,95}; \quad (7)$$

$$f_{com}(p) = 1 - \left(\frac{p - X \cdot R_{vh}}{X(1 - R_{vh})} \right)^2 \cdot H(X - p), \quad (8)$$

где R_{2b} — предел прочности на двухосное сжатие, может быть найден по формуле (6) согласно [5], используя значение R_b в МПа; R_{vh} — безразмерный

множитель к X , определяющий координату начала шатра сжатия по гидростатической оси, может быть найден по формуле (7) согласно [6], используя значение R_b в МПа; X — координата пересечения шатра сжатия с гидростатической осью, МПа; $H(X - p)$ — функция Хевисайда. Использование понижающей функции $f_{com}(p)$ позволяет создать плавный переход из регулярной функции в шатер сжатия без образования сингулярности.

$$r(e, \theta) = \frac{4 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta)^2 + C_2}{2 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta) + C_2 \cdot \sqrt{4 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta)^2 + 5 \cdot e^2 - 4 \cdot e}}; \quad (9)$$

$$C_1 = 1 - e^2; \quad (10)$$

$$C_2 = 2 \cdot e - 1; \quad (11)$$

$$e = \frac{1 + \xi}{2 - \xi}; \quad (12)$$

$$\xi = \frac{R_{bt}}{R_{2b}} \cdot \frac{R_{2b}^2 - R_b^2}{R_b^2 - R_{bt}^2}; \quad (13)$$

$$m = 3 \cdot \frac{R_b^2 - R_{bt}^2}{R_b \cdot R_{bt}} \cdot \frac{e}{e + 1}, \quad (14)$$

где $r(e, \theta)$ — эллиптическая функция, контролирующая степень скругления девиаторного сечения, описывается с помощью формул (9)–(14) согласно [7]; R_{bt} — предел прочности бетона на одноосное растяжение.

В модели используется неассоциированный закон пластического течения. Поверхность пластического потенциала является комбинированной и состоит из трех поверхностей: g_{ten}, g_{sh}, g_{com} (рис. 3).

Первая поверхность g_{ten} представляет собой сферу с центром в вершине поверхности нагруже-

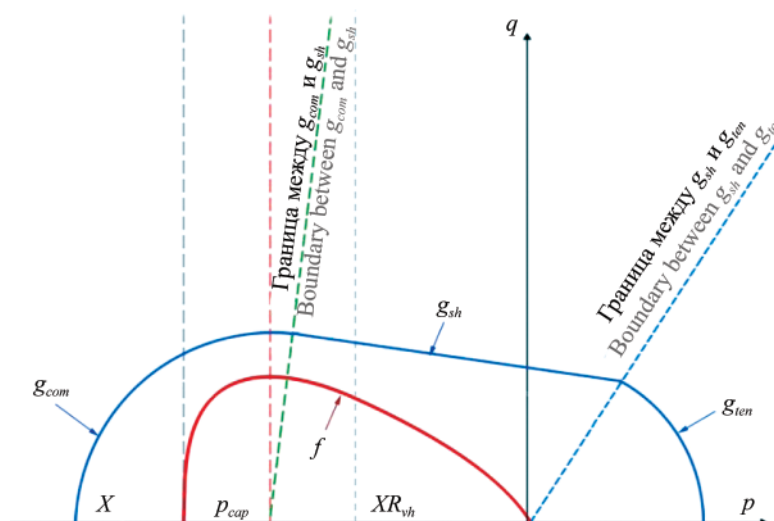


Рис. 3. Комбинированная поверхность пластического потенциала

Fig. 3. Combined flow potential surface

ния в зоне трехосного растяжения. Данная поверхность используется для обработки сингулярности в вершине поверхности нагружения [8], может быть описана уравнением (15):

$$g_{ten} = q^2 + \left(p - \frac{c_s \cdot R_b \cdot \sqrt{3}}{m} \right). \quad (15)$$

Вторая поверхность g_{sh} представляет собой полином второй степени, позволяющий смоделировать эффект дилатации, описывается уравнением (16):

$$g_{sh} = q^2 + A_g \cdot q + B_g \cdot p, \quad (16)$$

где A_g, B_g — безразмерные параметры поверхности g_{sh} . Для построения второй поверхности используются следующие предпосылки: при одноосном растяжении нормаль к поверхности g_{sh} совпадает с траекторией нагружения [9]; при одноосном сжатии угол между нормалью к поверхности g_{sh} и вертикалью равен углу дилатации Ψ_b ; при стремлении значения p -координаты к минус бесконечности угол между нормалью к поверхности g_{sh} и вертикалью должен стремиться к 0. Угол дилатации является параметром материала. Тангенс угла представляет собой соотношение между нормами тензора объемных пластических деформаций и девиатора пластических деформаций при одноосном сжатии. В общем виде угол дилатации может быть получен с помощью формулы (17):

$$\Psi_b = \arctan \left(\frac{\partial g_{sh} / \partial p}{\partial g_{sh} / \partial q} \right) = \arctan \left(\frac{B_g}{2 \cdot q + A_g} \right). \quad (17)$$

Используя данные предпосылки, можно получить уравнения (18) и (19), используемые для определения параметров A_g и B_g :

$$A_g = \frac{2 \cdot (\sqrt{2} \cdot \tan(\Psi_b) \cdot R_b - R_{bt})}{\sqrt{3} (1 / \sqrt{2} - \tan(\Psi_b))}; \quad (18)$$

$$B_g = \frac{A_g}{\sqrt{2}} + 2 \cdot \frac{R_{bt}}{\sqrt{3}}. \quad (19)$$

Для удовлетворения требования постулата Друкера параметр A_g должен быть положительным числом, что возможно при выполнении условия (20):

$$\arctan \left(\frac{R_{bt}}{R_b \cdot \sqrt{2}} \right) < \Psi_b < \arctan \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right). \quad (20)$$

На основании опытных данных или с помощью методик, представленных в нормативных документах, могут быть получены полные осевые деформации при одноосном сжатии. Используя допущение о том, что при достижении поверхности прочности в области одноосного сжатия полные объемные деформации равны нулю [10], может быть найден

тензор полных деформаций. Далее на основании закона Гука находятся упругие и, следовательно, пластические деформации (путем вычитания тензора упругих деформаций из тензора полных деформаций). Затем можно найти девиатор тензора пластических деформаций и объемный тензор пластических деформаций. Значение угла дилатации Ψ_b представляет собой результат деления нормы тензора объемных пластических деформаций на норму девиатора тензора пластических деформаций. Значения угла, полученные по приведенному выше алгоритму в зависимости от класса бетона, приведены в таблице.

Значение угла дилатации в зависимости от класса бетона

Dilation angle value according to concrete grade

Класс бетона Concrete grade	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50
Ψ_b	4,59	5,68	6,62	7,42	8,26	9,17	9,98	11,13

Третья поверхность g_{com} представляет собой сферу. Данная поверхность используется для возвращения точки на шатер сжатия. Центр сферы находится на гидростатической оси, при этом p -координата центра p_{cap} представляет собой координату экстремума функции поверхности нагружения (место перегиба функции). Выразив из уравнения (4) координату q , находим производную полученного выражения по координате p . Значение p_{cap} может быть найдено, приравняв числитель полученного выражения к нулю (единственное условие, при котором выражение может быть равно нулю). Результатом преобразований является квадратное уравнение, один из корней которого есть искомая величина p_{cap} . Алгоритм получения величины p_{cap} может быть сведен к уравнениям (21)–(24):

$$A = 4 \cdot \sqrt{3} \cdot c_h \cdot m; \quad (21)$$

$$B = -6 \cdot c_h \cdot (\sqrt{3} \cdot X \cdot R_{vh} \cdot m + R_b \cdot c_s); \quad (22)$$

$$C = 2\sqrt{3} \cdot c_h \cdot (2 \cdot R_{vh} - 1) \cdot m \cdot X^2 + 6 \cdot R_b \cdot c_h \cdot c_s \cdot X \cdot R_{vh}; \quad (23)$$

$$p_{cap} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}. \quad (24)$$

Третья поверхность g_{com} может быть получена с помощью уравнения (25):

$$g_{com} = q^2 + (p - p_{cap})^2. \quad (25)$$

Переход между поверхностями в рамках комбинированной поверхности пластического потенциала осуществляется с помощью условий (26), (27), (31):

$$g = g_{ten}, \text{ если } p > q \cdot \frac{B_g}{A_g} + \frac{c_s \cdot R_b \cdot \sqrt{3}}{m}. \quad (26)$$

Условие (26) представляет собой уравнение прямой, проходящей через вершину поверхности нагружения в зоне трехосного растяжения. Угловой коэффициент прямой получен из формулы (17) для точки с q -координатой вершины поверхности нагружения ($q = 0$):

$$g = g_{com}, \text{ если } p_{cap} > p_{g_sh}. \quad (27)$$

Условие заключается в сравнении двух гидростатических координат: p_{cap} — координата центра сферы для возврата на шатер сжатия и p_{g_sh} — гидростатическая координата точки, в которой линия, совпадающая с нормалью к поверхности g_{com} , пересекает гидростатическую ось. Значение p_{g_sh} может быть найдено с помощью формул (28)–(30):

$$k_{g_sh} = \frac{2 \cdot q + A_g}{B_g}; \quad (28)$$

$$b_{g_sh} = q - k_{g_sh} \cdot p; \quad (29)$$

$$p_{g_sh} = -\frac{b_{g_sh}}{k_{g_sh}}, \quad (30)$$

где k_{g_sh} — угловой коэффициент прямой, получаемый из формулы (17) на основании условия совпадения угловых коэффициентов рассматриваемой прямой и нормали к поверхности g_{sh} ; b_{g_sh} — свободный член рассматриваемой прямой. Использование данного условия позволяет выполнить плавный переход между поверхностями g_{sh} и g_{com} , исключая «слепые» зоны, в которые возврат точки невозможен. Таким образом, условие перехода к поверхности g_{sh} может быть сформулировано с помощью формулы (31):

$$g = g_{sh}, \text{ если } p \leq q \cdot \frac{B_g}{A_g} + \frac{c_s \cdot R_b \cdot \sqrt{3}}{m} \text{ и } p_{cap} \leq p_{g_sh}. \quad (31)$$

В модели используются два независимых механизма эволюции: девиаторная эволюция и эволюция шатра сжатия [11–15]. Девиаторная эволюция (изменение формы поверхности) включает в себя дисторсионное упрочнение наряду с дисторсионно-изотропным разупрочнением. Эволюция осуществляется за счет изменения параметра упрочнения c_h ($c_{h0} \leq c_h \leq 1$) и параметра разупрочнения c_s ($1 \geq c_s \geq c_{sres}$). Механизм девиаторной эволюции сконструирован так, чтобы отражать разницу работы материала при сжатии и растяжении. Где c_{h0} — начальное значение безразмерного параметра упрочнения, соответствующее нижней границе микротрещинообразования материала [16]. Данный параметр может быть найден на основании [17]

с помощью эмпирической формулы (32); c_{sres} — безразмерный параметр разупрочнения, контролирующий остаточные напряжения в конце графика разупрочнения. Законы упрочнения и разупрочнения задаются с помощью формул (33), (34):

$$c_{ho} = (1 - \exp(-0,052 \cdot R_b^{0,642})) \cdot R_b; \quad (32)$$

$$c_h = \begin{cases} c_{h0} + (1 - c_{h0}) \cdot k_p \cdot (k_p^2 - 3 \cdot k_p + 3), & k_p < 1, \\ 1, & k_p \geq 1; \end{cases} \quad (33)$$

$$c_h = \begin{cases} 1, & k_p \leq 1, \\ 1 - (1 - c_{cu}) \cdot (k_p - 1)^2, & 2 > k_p > 1, \\ c_{res} + (c_{cu} - c_{res}) \cdot \exp\left(2 \cdot (c_{cu} - 1) \cdot \frac{k_p - 2}{c_{cu} - c_{res}}\right), & k_p \geq 2, \end{cases} \quad (34)$$

где c_{cu} — параметр формы диаграммы; может быть задан равным 0,85. Геометрическая интерпретация законов упрочнения/разупрочнения представлена на рис. 4.

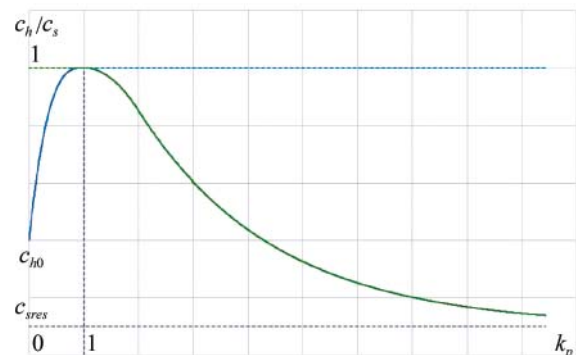


Рис. 4. Геометрическая интерпретация законов девиаторного упрочнения/разупрочнения

Fig. 4. Geometric interpretation of deviatoric hardening/softening laws

Законы упрочнения и разупрочнения являются функциями от внутренней переменной k_p (параметр Одквиста). Приращение переменной k_p контролируется с помощью оператора $h_D(k_p, \sigma)$, значение которого может быть найдено с помощью формулы (35). Эволюция внутренней переменной k_p описывается формулой (36) согласно [18]:

$$h_D(k_p, \sigma) = \begin{cases} \frac{\|m(k_p, \sigma)\|}{x_h(p)} \cdot \frac{(2 \cdot \cos(\theta))^2}{0,5 + \cos(\theta)}, & k_p < 1, \\ \frac{\|m(k_p, \sigma)\|}{x_s(p)} \cdot \frac{(2 \cdot \cos(\theta))^2}{0,5 + \cos(\theta)}, & k_p \geq 1; \end{cases} \quad (35)$$

$$dk_p = h_D \cdot d\lambda, \quad (36)$$

где $\mathbf{m}(k_p, \boldsymbol{\sigma}) = \partial g(\boldsymbol{\sigma}) / \partial \boldsymbol{\sigma}$ — производная поверхности пластического потенциала по тензору напряжений; $x_h(p)$, $x_s(p)$ — коэффициенты хрупкости для упрочнения и разупрочнения соответственно; $d\lambda$ — пластический множитель [19]. Данные коэффициенты контролируют приращение переменной k_p и, соответственно, параметров c_h и c_s в зависимости от степени гидростатического обжатия. Чем больше степень гидростатического обжатия, тем большая норма тензора пластических деформаций требуется для достижения поверхности нагружения, соответствующей $c_h = 1$ (поверхность прочности) и остаточной поверхности, соответствующей $c_s = c_{sres}$. Концепция упрочнения/разупрочнения с использованием коэффициента хрупкости была введена Г. Этсем и К. Вильямом [20]. В данной работе используется авторская модификация закона упрочнения из работ П. Грассла [21, 22]. Значения коэффициентов $x_h(p)$, $x_s(p)$ могут быть найдены с помощью формул (37–43):

$$R_{hs} = -\frac{p}{R_b} - \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (37)$$

$$x_h(p) = \begin{cases} E_h \cdot \exp\left(-\frac{R_{hs}}{F_h}\right) + D_h, & R_{hs} < 0, \\ A_h - (A_h - B_h) \cdot \exp\left(-\frac{R_{hs}}{C_h}\right), & R_{hs} \geq 0; \end{cases} \quad (38)$$

$$x_s(p) = \begin{cases} E_s \cdot \exp\left(-\frac{R_{hs}}{F_s}\right) + D_s, & R_{hs} < 0, \\ A_h - (A_h - B_s) \cdot \exp\left(-\frac{R_{hs}}{C_h}\right), & R_{hs} \geq 0; \end{cases} \quad (39)$$

$$E_h = B_h - D_h; \quad (40)$$

$$F_h = \frac{E_h \cdot C_h}{B_h - A_h}; \quad (41)$$

$$E_s = B_s - D_s; \quad (42)$$

$$F_s = \frac{E_s \cdot C_h}{B_s - A_h}. \quad (43)$$

Параметры $A_h, B_h, C_h, D_h, B_s, D_s$ контролируют зависимость коэффициентов хрупкости от p . Данные параметры устанавливаются на основании результатов трехосных испытаний, либо с помощью инженерной методики [23] с использованием осевых деформаций согласно [24]. Для классов бетона В15–В50, нормируемым согласно СП 63.13330.2018², могут быть использованы следующие значения: $A_h = 0,22$; $B_h = 0,00262$; $D_h = 0,00001$; $B_s = 0,00367$;

² СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : введен 20.06.2019.

$D_s = D_h$. Параметр C_h может быть найден с помощью эмпирической формулы (44):

$$C_h = 12,4 + \frac{10 - B}{6,25}, \quad (44)$$

где B — класс бетона.

Механизм девиаторной эволюции поверхности нагружения представлен на рис. 5.

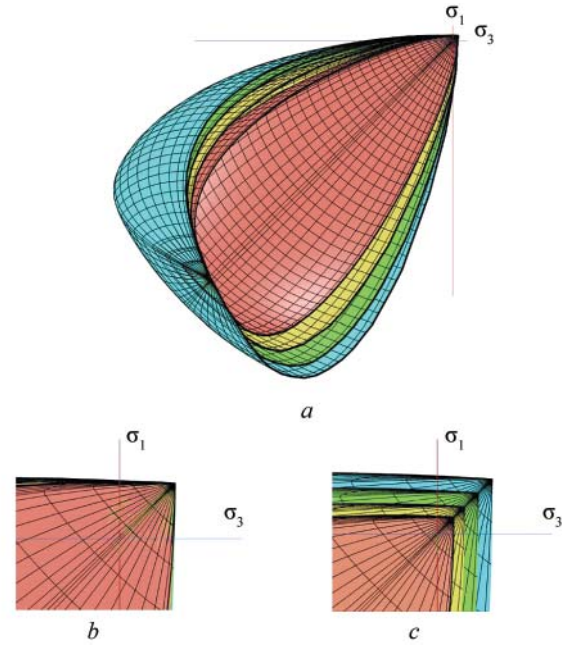


Рис. 5. Механизм девиаторной эволюции поверхности нагружения: а — общий вид на механизм эволюции; б — упрочнение в зоне вершины поверхности нагружения; с — разупрочнение в зоне вершины поверхности нагружения

Fig. 5. Loading surface deviatoric evolution mechanism: a — general view of the evolution mechanism; b — hardening in the loading surface apex area; c — softening in the loading surface apex area

Эволюция шатра сжатия представлена дисторсионным упрочнением и контролируется с помощью внутренней переменной X , являющейся координатой пересечения шатра сжатия с гидростатической осью; позволяет смоделировать необратимую сжимаемость материала. Приращение переменной X контролируется с помощью оператора h_v , задается формулой (45) и зависит от объемных пластических деформаций ε_{pv} (46). Эволюция шатра сжатия позволяет смоделировать пластическую сжимаемость бетона (контракцию) [25]:

$$h_v = A_{hV}; \quad (45)$$

$$\varepsilon_{pv} = \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2} + \varepsilon_{p3}, \quad (46)$$

где ε_{p1} , ε_{p2} , ε_{p3} — первые, вторые и третьи главные пластические деформации соответственно. Параметр A_{hV} является константой материала и может

быть найден с помощью формулы (47). Эволюция внутренней переменной X описывается выражением (48); текущее значение X может быть найдено с помощью формулы (49):

$$A_{hV} = \frac{3 \cdot E_b \cdot (1 - \nu)}{5 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; \quad (47)$$

$$dX = h_V \cdot d\epsilon_{pV} = A_{hV} \cdot d\lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \mathbf{m}(k_p, \sigma); \quad (48)$$

$$X = X_0 + dX, \quad (49)$$

где δ_{ij} — дельта Кронекера; X_0 — начальное значение координаты X , которое может быть найдено по формуле (50) согласно [6], используя значение R_b в МПа:

$$X_0 = -17,1 - 1,89 \cdot R_b. \quad (50)$$

Механизм эволюции шатра сжатия представлен на рис. 6.

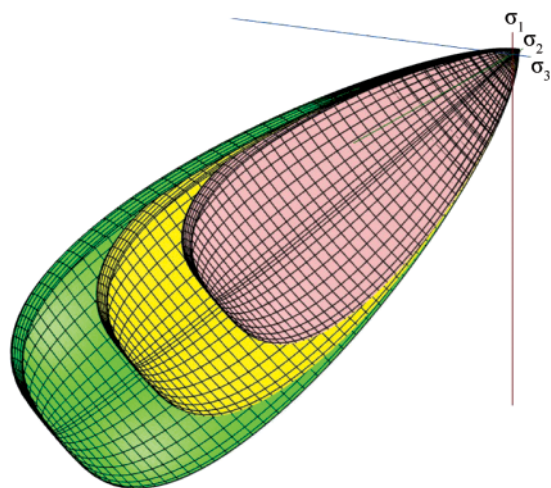


Рис. 6. Механизм эволюции шатра сжатия поверхности нагружения

Fig. 6. Loading surface compression tent mechanism

Значение пластического множителя для метода секущей плоскости (cutting plane algorithm) может быть получено на основании условия согласованности Прагера согласно формуле (51) по аналогии с [26]:

$$d\lambda = \frac{f^{tr}}{\mathbf{n}(k_p, \sigma) : D : \mathbf{m}(k_p, \sigma) - \frac{df^{tr}}{dk_p} \cdot h_D - \frac{df^{tr}}{dX} \cdot h_V}, \quad (51)$$

где $\mathbf{n}(k_p, \sigma) = \partial f(\sigma) / \partial \sigma$ — производная поверхности нагружения по тензору напряжений; D — матрица жесткости; f^{tr} — значение функции поверхности нагружения (4), (5) с пробными значениями координат.

Механизм эволюции поверхности нагружения зависит от того, в какой области находится точка: область девиаторной эволюции 1, область эволюции шатра сжатия 2, область смешанной эволюции 3. Области эволюции поверхности нагружения представлены на рис. 7.

Граница между областями 1 и 2 разделяет области дилатации и контракции. Граница представляет собой линию, описываемую уравнением (52):

$$p = p_{cap}. \quad (52)$$

Граница между зонами 2 и 3 представляет собой линию, описываемую уравнением (53):

$$q = k_b \cdot (p - p_{cap}), \quad (53)$$

где k_b — угловой коэффициент прямой, может быть принят равным $-0,7$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Деформационно-прочностная модель бетона была реализована в программном конечно-элементном комплексе ANSYS, позволяющем реализовывать пользовательские модели материала. Для верификации представленной модели материала было

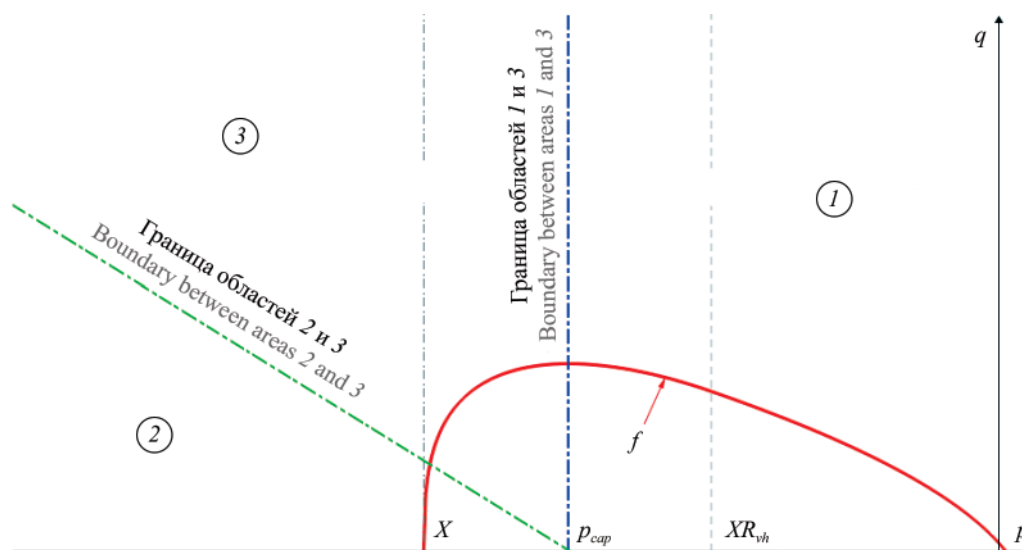


Рис. 7. Области эволюции поверхности нагружения

Fig. 7. Loading surface evolution areas

выполнено сравнение результатов численных испытаний, полученных с помощью модели материала, и результатов лабораторных испытаний. На всех изображениях, демонстрирующих сравнение численных и опытных данных, линиями показаны результаты численных испытаний, точками — результаты, полученные в лаборатории.

В опытах Х. Купфера [27] на бетонных образцах-пластинах воссоздавалась работа материала

при плоском напряженном состоянии. Образцы разных серий испытывались при различных соотношениях главных напряжений. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 32\,000$ МПа; $\nu = 0,18$; $R_b = 32,8$ МПа; $R_{bt} = 3,3$ МПа. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний представлено на рис. 8, 9 (в легенде для каждого опыта указано соотношение ненулевых главных напряжений).

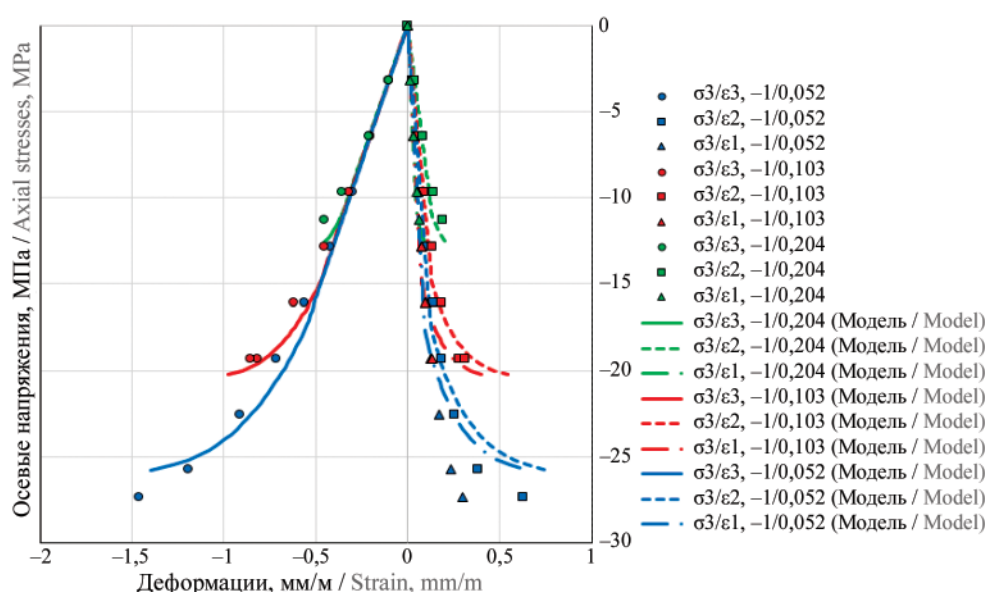


Рис. 8. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных Х. Купфером для образцов, испытывающих сжатие-растяжение

Fig. 8. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by H. Kupfer for samples under compression-tension

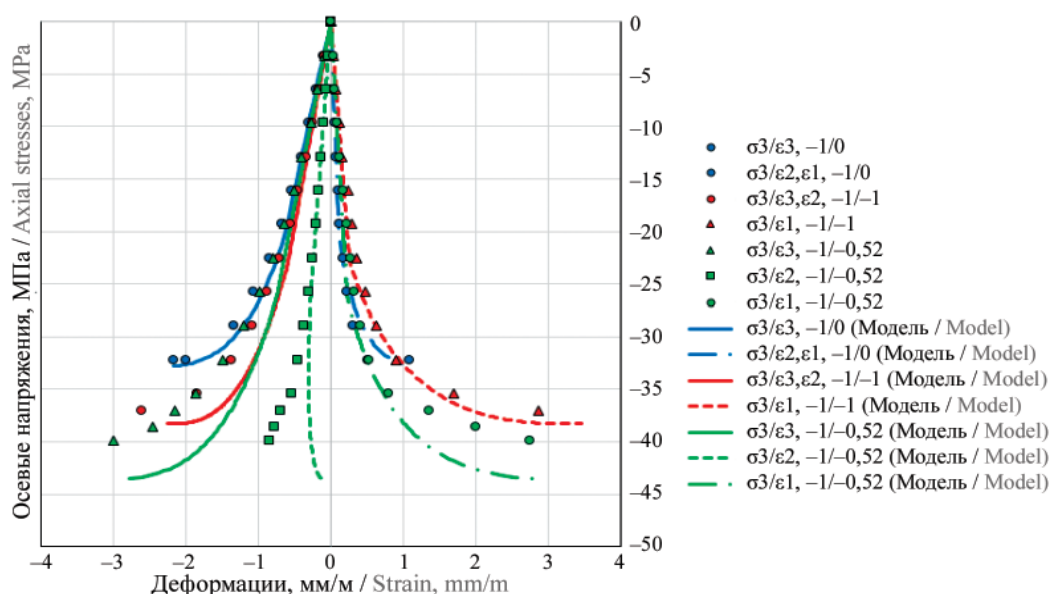


Рис. 9. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных Х. Купфером для образцов, испытывающих сжатие-сжатие

Fig. 9. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by H. Kupfer for samples under compression-compression

В опытах И. Имрана [28] на бетонных образцах-цилиндрах воссоздавалась работа материала при объемном напряженном состоянии. Испытание проходило в два этапа: на первом этапе цилиндр нагружался боковым давлением, на втором этапе при постоянном боковом давлении происходило осевое деформирование образца. Образцы разных серий

испытывались при разных значениях бокового давления. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 30\,000$ МПа; $\nu = 0,15$; $R_b = 47,4$ МПа; $R_{bt} = 4,74$ МПа. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний представлено на рис. 10, 11; рядом с результатами каждого испытания указаны главные напряжения бокового давления.

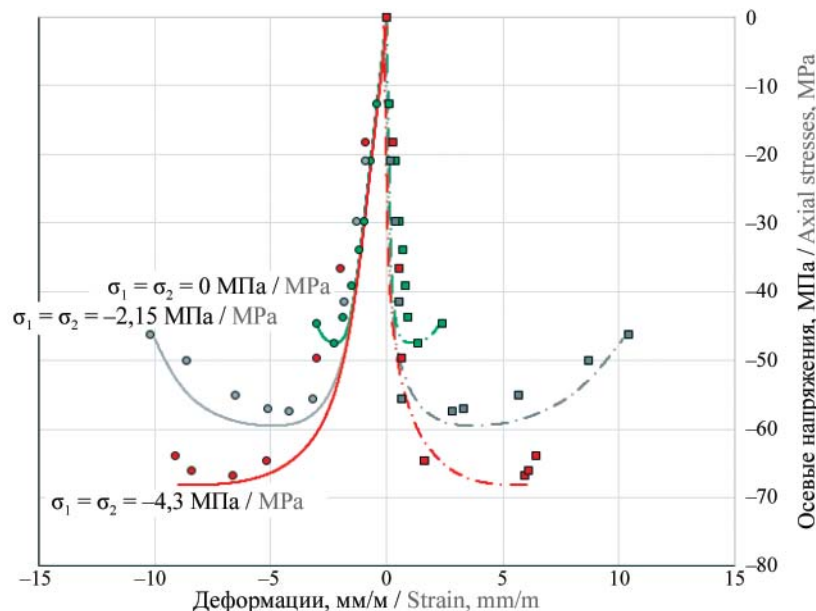


Рис. 10. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных И. Имраном для образцов, испытывающих боковое давление от 0 до -4,3 МПа

Fig. 10. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by I. Imran for samples with lateral compression from 0 to -4.3 MPa

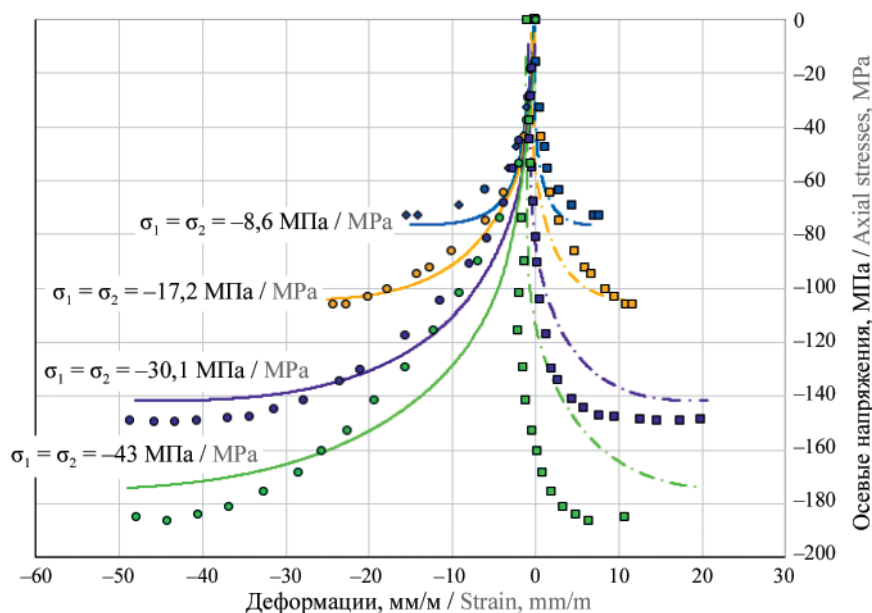


Рис. 11. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных И. Имраном для образцов, испытывающих боковое давление от -8,6 до -43 МПа

Fig. 11. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by I. Imran for samples with lateral compression from -8.6 to -43 MPa

В опытах, описанных в работе Ф.К. Канера [29], на образцах-цилиндрах воссоздавалась работа бетона при объемном напряженном состоянии. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 25\,000$ МПа; $\nu = 0,2$; $R_b = 45,7$ МПа; $R_{bt} = 4,57$ МПа.

В первой серии опытов испытание проходило в два этапа: на первом этапе цилиндр нагружался трехосным равномерным сжатием, на втором этапе при постоянном боковом давлении происходило

осевое деформирование образца. Образцы разных серий испытывались при различных значениях предварительного трехосного обжатия. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний представлено на рис. 12.

Во второй серии опытов образцы подвергались трехосному равномерному сжатию. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний представлено на рис. 13.

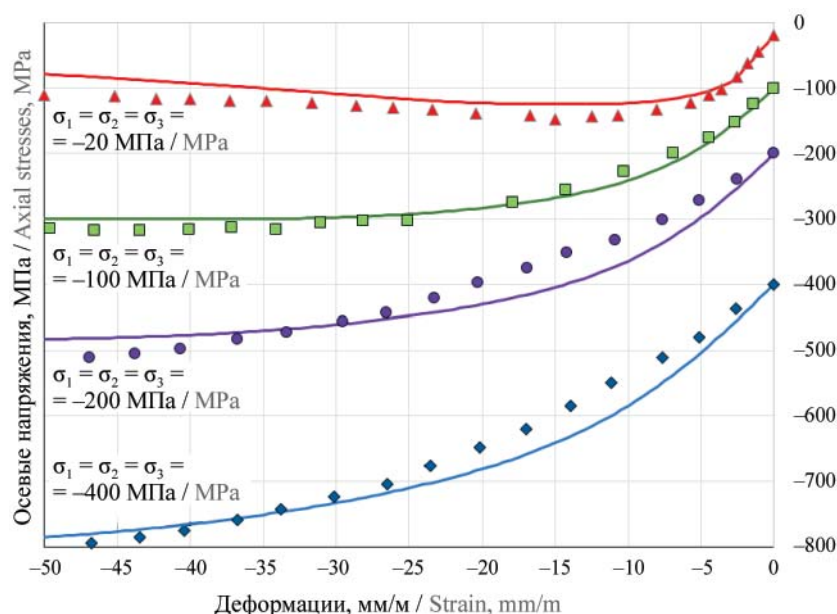


Рис. 12. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, описанных в работе Ф.К. Канера для образцов, испытывающих осевое сжатие с предварительным трехосным равномерным сжатием

Fig. 12. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by F.C. Caner for samples with preliminary triaxial isotropic compression

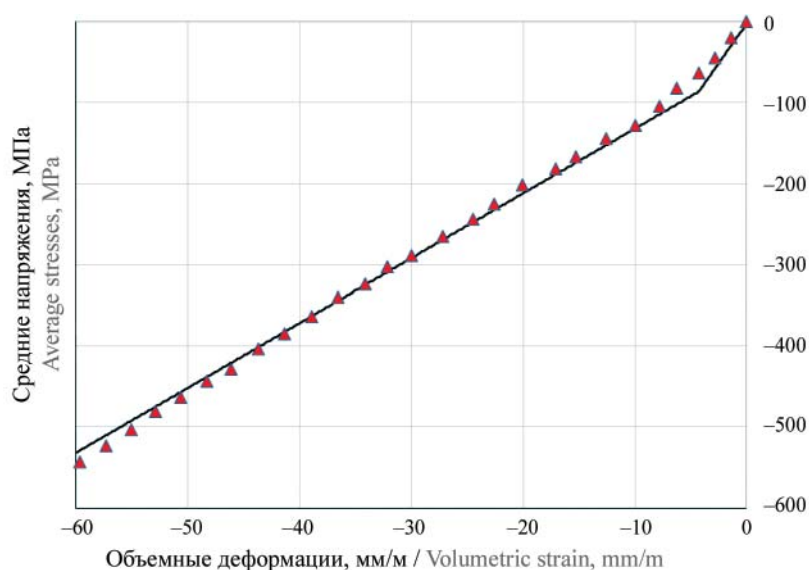


Рис. 13. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, описанных в работе Ф.К. Канера для образцов, испытывающих трехосное равномерное сжатие

Fig. 13. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by F.C. Caner for samples with triaxial isotropic compression

В работе [30] описаны испытания шарнирно опертых железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролета. В качестве образца для численного испытания была выбрана балка ОА1. Длина балки составляет 4100 мм, расстояние между опорами 3660 мм. Геометрические характеристики сечения балки в мм представлены на рис. 14.

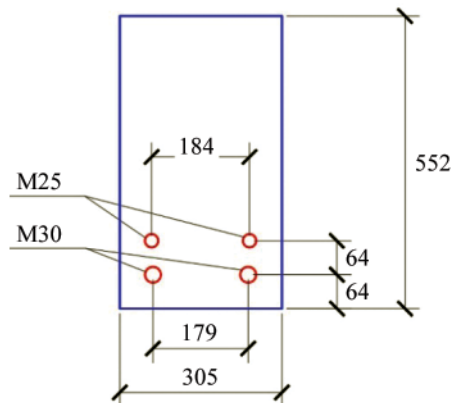


Рис. 14. Поперечное сечение балки ОА1 согласно [30]

Fig. 14. Cross section of the beam OA1 concerning [30]

Бетон балки имел следующие характеристики: $E_b = 36\,500$ МПа; $\nu = 0,2$; $R_b = 22,6$ МПа. Арматура М25 имела следующие характеристики: диаметр $d = 25,2$ мм; модуль упругости $E_s = 220\,000$ МПа; $\nu = 0,3$; $R_s = 445$ МПа; арматура М30 имела следующие характеристики: $d = 29,9$ мм; $E_s = 200\,000$ МПа; $\nu = 0,3$; $R_s = 436$ МПа. На рис. 15 приведено сравнение кривых нагрузка-деформации для лабораторного и численного образцов; на рис. 16 приведено

сравнение картины трещинообразования, полученной в ходе лабораторного испытания, изополей и векторов главных пластических деформаций.

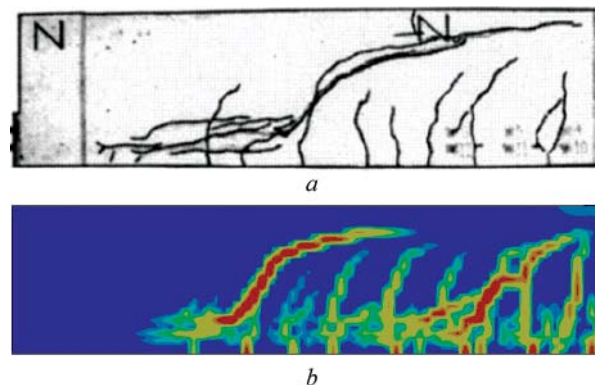


Рис. 16. Сравнение результатов: *a* — картина трещинообразования, полученная на лабораторном образце согласно [30]; *b* — первые главные пластические деформации цифрового двойника балки

Fig. 16. Comparison of the results: *a* — crack pattern of the laboratory sample concerning [30]; *b* — first principal plastic strain pattern of the beam digital twin

Разница в значении предельной нагрузки составляет 6 %, разница в прогибе, соответствующем значению предельной нагрузки, составляет 4 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами разработаны и сформулированы основные математические зависимости модели материала: уравнение поверхности нагружения, уравнение

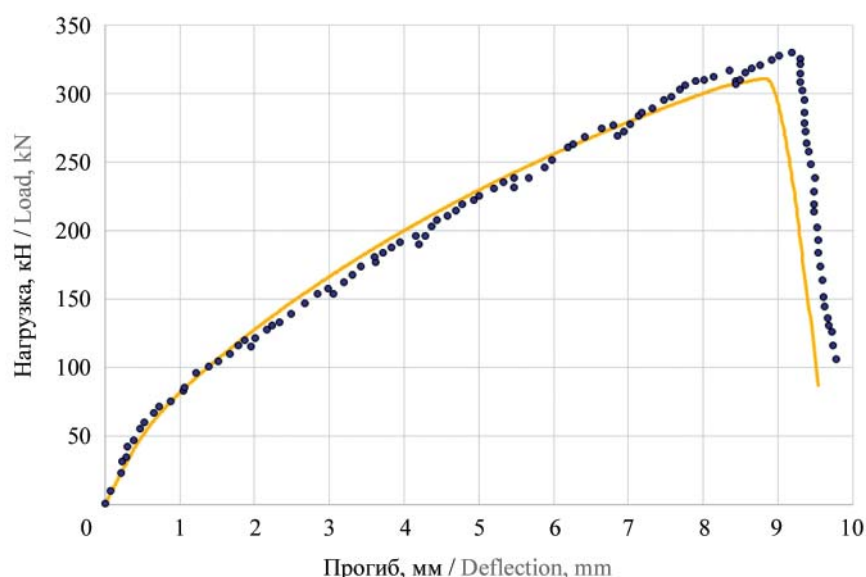


Рис. 15. Сравнение графиков нагрузка-прогиб для балки ОА1 (точки) и ее цифрового двойника (сплошная линия)

Fig. 15. Comparison of load-deflection diagrams for beam OA1 (dots) and its digital twin (solid line)

поверхности пластического потенциала; приведены формулы, описывающие законы эволюции модели (девиаторное упрочнение и разупрочнение, упрочнение шатра сжатия), а также правила их работы; даны значения параметров, необходимых для использования модели материала. Уравнение поверхности нагружения имеет единственную зону сингулярности.

Представленная в работе деформационно-прочностная модель бетона учитывает следующие особенности поведения материала:

1) различный характер поведения бетона при сжатии и растяжении. Данная характеристика воспроизводится с помощью двойного независимого механизма эволюции модели с дисторсионным девиаторным упрочнением и дисторсионно-изотропным разупрочнением;

2) влияние вида напряженного состояния на эволюцию материала и его деформативность. Данные факторы учитываются с помощью введе-

ния коэффициентов хрупкости $x_h(p)$, $x_s(p)$ (являются функцией от степени гидростатического обжатия) и угла подобия θ в выражение для получения оператора $h_D(k_p, \sigma)$, контролирующего приращение внутренней переменной k_p ;

3) эффекты дилатации и необратимой сжимаемости бетона учитываются путем введения комбинированной поверхности пластического потенциала, в которой поверхность g_{sh} отвечает за учет дилатации, а поверхность g_{com} отвечает за учет контракции.

На основании сравнения результатов численного моделирования, выполненного в программном комплексе ANSYS, и результатов лабораторных испытаний можно заключить, что представленная деформационно-прочностная модель бетона позволяет с достаточной точностью описывать напряженно-деформированное состояние бетона в условиях статического простого кратковременного нагружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А.* Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с.
2. *Mirmiran A., Shahawy M.* Dilation characteristics of confined concrete // *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1997. Vol. 2. Issue 3. Pp. 237–249. DOI: 10.1002/(sici)1099-1484(199707)2:3<237::aid-cfm32>3.0.co;2-2
3. *Burlion N., Pijaudier-Cabot G.* Experimental analysis of compaction of concrete and mortar // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2001. Vol. 25. Issue 15. Pp. 1467–1486. DOI: 10.1002/nag.178
4. *Menetrey P., William K.J.* A triaxial failure criterion for concrete and its generalization // *ACI Structural Journal*. 1995. Vol. 92. Issue 3. Pp. 311–318. DOI: 10.14359/1132
5. *Beverly P.* FIB model code for concrete structures 2010. 2013.
6. *Jiang H., Zhao H.* Calibration of the continuous surface cap model for concrete // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol. 97. Pp 1–19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002
7. *Menetrey P.* Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures : Ph.D. Thesis. Lausanne : EPFL, 1994. DOI: 10.5075/epfl-thesis-1279
8. *Карпенко Н.И., Круглов В.М., Соловьев Л.Ю.* Нелинейное деформирование бетона и железобетона. Новосибирск : СГУПС, 2001. 276 с.
9. *Smith S.H.* On fundamental aspects of concrete behavior : Master's thesis. Boulder, University of Colorado at Boulder, 1985.
10. *Grassl P., Lundgren K., Gylltoft K.* Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law // *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39. Issue 20. Pp. 5205–5223. DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00408-0
11. *Соловьев Л.Ю.* Нелинейная модель бетона на основе теории пластического течения // *Systems. Methods. Technologies*. 2014. Vol. 4. Issue 24. Pp. 131–140.
12. *Jang B.L., Dafalias J.F., Herrmann I.R.* A bounding surface plasticity model for concrete // *Journal of Engineering Mechanics*. 1985. Vol. 111. Issue 3. Pp. 359–380.
13. *Hirai H.* Modeling of elastoplastic behaviour of concrete based on a nonassociative flow rule // *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University*. 1987. Vol. 32. Issue 2. Pp. 131–141.
14. *Wolffersdorf P.-A.* Algorithmus zur Entwicklung allgemeiner elasto-plastischer Stoffgleichungen und dessen anwendung auf bodenmechanische doppelverfestigungs-Modelle // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur*. 1985. Vol. 31. Issue 6. Pp. 288–291.
15. *Wolffersdorf P.-A.* Beitrag zum entwicklungsstand elastoplastischer stoffgesetze in der bodenmechanik // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur*. 1985. Vol. 31. Issue 6. Pp. 254–256.
16. *Берг О.Я.* Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1962. 98 с.
17. *Истомин А.Д., Беликов Н.А.* Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2. С. 159–162. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ouvytl>

18. Chen W.F., Saleeb A.F. Constitutive equations for engineering materials. Volume 2: Plasticity and Modeling. Amsterdam : Elsevier, 1994. 1129 p.
19. Семенов А.С. Вычислительные методы в теории пластичности. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 210 с.
20. Etse G., William K. Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete // Journal of Engineering Mechanics. 1994. Vol. 120. Issue 9. Pp. 1983–2011. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1994)120:9(1983)
21. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. Pp. 7166–7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.12.005
22. Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete // International Journal of Solids and Structures. 2013. Vol. 50. Issue 24. Pp. 3805–3816. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008
23. Samani A.K., Attard M.M. Lateral strain model for concrete under compression // ACI Structural Journal. 2014. Vol. 111. Pp. 441–452. DOI: 10.14359/51686532
24. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
25. Bažant Z.P., Bishop F.C., Chang T. Confined compression tests of cement paste and concrete up to 300 ksi // ACI Structural Journal. 1986. Vol. 83. Pp. 553–560. DOI: 10.14359/10448
26. Fossum A.F., Fredrich J.T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation // 4th North American Rock Mechanics Symposium (July 31 – August 3, 2000) Seattle, Washington. Pp. 1169–1176.
27. Kupfer H., Hilsdorf H.K., Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1969. Vol. 99. Issue 4. Pp. 853–866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789
28. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress // ACI Materials Journal. 1996. Vol. 93. Pp. 689–691.
29. Caner F.C., Bažant Z.P. Microplane model M4 for concrete. II: Algorithm and calibration // Journal of Engineering Mechanics. 2000. Vol. 126. Issue 9. Pp. 954–961. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(954)
30. Vecchio F.J., Shim W. Experimental and analytical reexamination of classic concrete beam tests // Journal of Structural Engineering. 2004. Vol. 130. Issue 3. Pp. 460–469. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:3(460)

Поступила в редакцию 24 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 14 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Михайлович Бударин — руководитель группы отдела расчетных обоснований; Институт Гидропроект; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; alex.budarin01@gmail.com;

Георгий Игоревич Ремпель — главный эксперт отдела расчетных обоснований; Институт Гидропроект; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; g.rempel@hydroproject.ru;

Алексей Александрович Камзолкин — самозанятый; holinmail@mail.ru;

Владимир Николаевич Алехин — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой САПР объектов строительства; Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; РИНЦ ID: 549888, Scopus: 7004307891, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0001-8291-6052; v.n.alekhin@urfu.ru.

Вклад авторов:

Бударин А.М. — концепция исследования, сбор материала и обработка данных, реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование.

Ремпель Г.И. — реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование.

Камзолкин А.А. — реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование.

Алехин В.Н. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Geniev G., Kissuk V., Tupin G. *Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974; 316. (rus.).
2. Mirmiran A., Shahawy M. Dilation characteristics of confined concrete. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*. 1997; 2(3):237-249. DOI: 10.1002/(sici)1099-1484(199707)2:3<237::aid-cfm32>3.0.co;2-2
3. Burlion N., Pijaudier-Cabot G., Dahan N. Experimental analysis of compaction of concrete and mor-

- tar. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2001; 25(15):1467-1486. DOI: 10.1002/nag.178
4. Menetrey P., William K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995; 92(3):311-318. DOI: 10.14359/1132
 5. Beverly P. *FIB model code for concrete structures 2010*. 2013.
 6. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 97:1-19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002
 7. Menetrey P. *Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures : Ph.D. Thesis*. Lausanne, EPFL, 1994. DOI: 10.5075/epfl-thesis-1279
 8. Karpenko N.I., Kruglov V.M., Solov'ev L.Yu. *Nonlinear deformation of plain concrete and reinforced concrete*. Novosibirsk, SGUPS, 2001; 276. (rus.).
 9. Smith S.H. *On fundamental aspects of concrete behavior : Masters's Thesis*. Boulder, University of Colorado at Boulder, 1985.
 10. Grassl P., Lundgren K., Gylltoft K. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law. *International Journal of Solids and Structures*. 2002; 39(20):5205-5223. DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00408-0
 11. Solov'ev L.Yu. Non-linear concrete model based on the plastic flow theory. *Systems. Methods. Technologies*. 2014; 4(24):131-140.
 12. Yang B., Dafalias Y., Herrmann L. A bounding surface plasticity model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985; 111(3):359-380.
 13. Hirai H. Modeling of elastoplastic behaviour of concrete based on a nonassociative flow rule. *Memoirs of the Faculty of Engineering Kumamoto University*. 1987; 32(2):131-141.
 14. Wolffersdorf P.A. Algorithmus zur Entwicklung allgemeiner elasto-plastischer Stoffgleichungen und dessen anwendung auf bodenmechanische doppelte-festigungs-Modelle. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur*. 1985; 31(6):288-291. (ger.).
 15. Wolffersdorf P.A. Beitrag zum entwicklungsstand elastoplastischer stoffgesetze in der bodenmechanik. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur*. 1985; 31(6):254-256. (ger.).
 16. Berg O.Ya. *Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1962; 98. (rus.).
 17. Istomin A.D., Belikov N.A. Dependence of the borders of the microcreeping in concrete from strengs and strain condition. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 2:159-162. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ouvytl> (rus.).
 18. Chen W., Saleeb A. *Constitutive equations for engineering materials. Volume 2: Plasticity and modeling*. Amsterdam, Elsevier, 1994; 1129.
 19. Semenov A.S. *Computational methods in theory of plasticity*. Saint Petersburg, SPbGPU, 2008; 210. (rus.).
 20. Etse G., Willam K. Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 1994; 120(9):1983-2011. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1994)120:9(1983)
 21. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure. *International Journal of Solids and Structures*. 2006; 43(22-23):7166-7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.12.005
 22. Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPm2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 2013; 50(24):3805-3816. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008
 23. Samani A.K., Attard M.M. Lateral strain model for concrete under compression. *ACI Structural Journal*. 2014; 111(2):441-452.
 24. Karpenko N.I. *General Models of the Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996; 416. (rus.).
 25. Bažant Z.P., Bishop F.C., Chang T. Confined compression tests of cement paste and concrete up to 300 ksi. *ACI Structural Journal*. 1986; 83(4):553-560. DOI: 10.14359/10448
 26. Fossum A.F., Fredrich J.T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation. *4th North American Rock Mechanics Symposium. July 31–August 3, 2000*. Seattle, Washington, 2000; 1169-1176.
 27. Kupfer H., Gerstle K. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1973; 99(4):853-866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789
 28. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress. *ACI Materials Journal*. 1996; 93(6):689-601.
 29. Caner F., Bažant Z. Microplane model M4 for concrete. II: Algorithm and calibration. *Journal of Engineering Mechanics*. 2000; 126(9):954-961. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(954)
 30. Vecchio F., Shim W. Experimental and analytical reexamination of classic concrete beam tests. *Journal of Structural Engineering*. 2004; 130(3):460-469. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:3(460)

Received September 24, 2022.

Adopted in revised form on March 14, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Alexander M. Budarin** — group executive of structural analysis department; **Hydroproject**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; alex.budarin01@gmail.com;

Georgy I. Rempel — chief expert of structural analysis department; **Hydroproject**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; g.rempel@hydroproject.ru;

Alexey A. Kamzolkyn — self-employed; holinmail@mail.ru;

Vladimir N. Alekhin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Chair of the Department of CAD Systems in Civil Engineering; **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RISC: 549888, Scopus: 7004307891, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0001-8291-6052; v.n.alekhin@urfu.ru.

Contribution of the authors:

Alexander M. Budarin — research concept, data gathering and processing, implementation in finite-element software package, scientific editing of the text.

Georgy I. Rempel — implementation in finite-element software package, scientific editing of the text.

Alexey A. Kamzolkyn — implementation in finite-element software package, scientific editing of the text.

Vladimir N. Alekhin — scientific management.

The authors declare no conflicts of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.012.45

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544

Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа

Валерия Александровна Пшеничкина, Борис Степанович Гриценко,
Антон Викторович Глухов, Виктория Викторовна Габова,
Максим Евгеньевич Дубовский

*Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Для объектов промышленного назначения важным фактором, снижающим их долговечность, являются коррозионные повреждения арматуры и бетона. Приведена методика и результаты вероятностного расчета остаточного ресурса отдельных, а также работающих в системе железобетонных конструкций промышленного здания. Рассматривается трехэтажная открытая этажерка с размерами в плане 30 × 15 м и высотой 25 м. Расчетные параметры фактического состояния конструкций получены на основе данных экспериментально-диагностических исследований.

Материалы и методы. По результатам натурного инженерного освидетельствования с использованием стандартных и нестандартных методов неразрушающего контроля установлены наиболее поврежденные конструкции каркаса — железобетонные балки перекрытия. Определена степень коррозионного повреждения рабочей арматуры и сжатого бетона. Изложена методика вероятностного расчета железобетонной балки с учетом коррозионного износа. Предельный изгибающий момент в сечении балки рассматривается как нелинейная функция двух случайных аргументов — прочности бетона и прочности арматуры. Принят линейный закон накопления коррозионных повреждений. Вероятностные характеристики предельного изгибающего момента найдены методом Монте-Карло на основе нормативного метода расчета прямоугольного железобетонного сечения с двойной арматурой. Для определения численных значений вероятности отказа и времени наработки использован индекс надежности.

Результаты. Получены статистические характеристики предельного изгибающего момента, изменяющегося во времени от начала истощения защитных свойств бетона для отказа элемента. Найдено время наработки до отказа при заданной гарантируемой безопасности.

Выводы. Показано практическое приложение вероятностной методики в сочетании с данными натурных обследований для решения задачи оценки остаточного ресурса железобетонных балок реального промышленного здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коррозия бетона и арматуры, защитный слой бетона, скорость коррозионного износа, изгибаемые элементы, остаточный ресурс конструкции, диагностика строительных конструкций, структурная схема надежности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пшеничкина В.А., Гриценко Б.С., Глухов А.В., Габова В.В., Дубовский М.Е. Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 533–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544

Автор, ответственный за переписку: Антон Викторович Глухов, tracketbow@list.ru.

Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account corrosion wear

Valeria A. Pshenichkina, Boris S. Gritsenko, Anton V. Glukhov, Victoria V. Gabova,
Maxim E. Dubovsky

*Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU);
Volgograd, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Corrosion damage of reinforcement and concrete is an important factor reducing durability of industrial facilities. The article presents the methodology and results of probabilistic calculation of residual life of separate reinforced concrete structures of an industrial building as well as of reinforced concrete structures working in the system. A three-storey open stand with dimensions in terms of 30 × 15 m and 25 m in height is considered. The calculated parameters of the actual state of the structures are obtained on the basis of experimental diagnostic studies.

Materials and methods. According to the results of a full-scale field engineering inspection using standard and non-standard methods of non-destructive testing, the most damaged structures of the framework — reinforced concrete floor beams have been determined. The degree of corrosion damage of working reinforcement and compressed concrete has been determined. The method of probabilistic calculation of a reinforced concrete beam with regard for corrosion deterioration

is outlined. The limiting bending moment in the beam section is considered as a nonlinear function of two random arguments — the strength of concrete and the strength of reinforcement. A linear law of corrosion damage accumulation is adopted. The probabilistic characteristics of the limiting bending moment are found by the Monte Carlo method on the basis of the normative method of calculation of a rectangular reinforced concrete section with double reinforcement. The reliability index has been used to determine the numerical values of the probability of failure and operating time.

Results. Statistical characteristics of bending moment limit changing in time from the beginning of concrete protective properties exhaustion to element failure have been obtained. Lifetime before failure for a given guaranteed safety is found out.

Conclusions. The practical application of the probabilistic method combined with field survey data to solve the problem of assessing the residual service life of reinforced concrete beams of a real industrial building is shown.

KEYWORDS: corrosion of concrete and reinforcement, protective layer of concrete, rate of corrosion wear, bendable elements, residual resource of structure, diagnostics of building structures, structural scheme of reliability

FOR CITATION: Pshenichkina V.A., Gritsenko B.S., Glukhov A.V., Gabova V.V., Dubovsky M.E. Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account corrosion wear. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):533-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544 (rus.).

Corresponding author: Anton V. Glukhov, tracketbow@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, снижающим долговечность конструкций промышленных зданий, работающих в условиях агрессивных сред, является коррозионный износ арматуры и бетона. В начальной стадии коррозии приводит к образованию трещин, повреждению защитного слоя бетона, а в дальнейшем — к нарушению совместной работы бетона и арматуры, изменению расчетной схемы и характера распределения внутренних усилий, уменьшению расчетных сечений несущих элементов конструкций.

Натурное обследование, как правило, выявляет ярко выраженную неравномерность коррозионных повреждений не только отдельных конструкций сооружения, работающих в одинаковых условиях воздействия агрессивной среды, но и наличие локальных зон различной степени износа даже в пределах одной конструкции. Это связано с неоднородностью ее напряженно-деформированного состояния (НДС). По мере увеличения коррозионного износа происходит перераспределение НДС отдельных зон внутри конструкции. То есть скорость и характер коррозионных повреждений железобетонных конструкций напрямую зависят от уровня их НДС. Экспериментально-теоретические исследования влияния локальной коррозии железобетонных балок, приведенные в работе [1], показали значительное снижение их несущей способности по сравнению с железобетонными балками, имеющими равномерное распределение коррозии по всей длине.

Большое количество исследований посвящено экспериментальному изучению процессов протекания коррозии в бетоне и арматуре: измерению скорости коррозии на поверхности арматурного стержня в режиме реального времени [2], оценке влияния степени коррозии арматуры на запас прочности бетона [3] и величину сцепления арматуры с бетоном при различных соотношениях толщины защитного слоя и диаметра арматуры [4].

Как отмечено в [5], в настоящее время используется два вида моделей коррозионного износа железобетонных конструкций — физико-химическая

и математическая. Модели первого вида основаны на физико-химической сущности явления коррозии, при этом одновременно учитывается большое количество факторов (диффузия, растворение и химическое взаимодействие составляющих внешней среды и материала конструкций и др.) [6–8]. В работе [9] для оценки вероятности отказа железобетонных конструкций применялась модель распространения коррозии арматуры, вызванной воздействием ионов хлора и углекислого газа. Решение получено методом статистических испытаний. Модель процесса разрушения защитного слоя в результате коррозионного расширения бетона рассмотрена в работе [10]. Решение задачи оценки долговечности железобетонных конструкций на основе статистического моделирования повреждений бетона, вызываемых коррозией арматуры, приведено в [11].

Эти модели обладают хорошей сходимостью с данными испытаний, но содержат множество параметров, индивидуальных для конкретных конструкций и условий эксплуатации, что существенно усложняет их применение в инженерной практике.

В практических задачах оценки остаточного ресурса эксплуатируемых зданий, учитывая ограниченное количество технических освидетельствований, которые проводятся за время эксплуатации, и применение выборочного метода контроля, целесообразно использование интегральных математических моделей коррозии, среди которых наибольшее распространение получили линейная и степенная [8, 12, 13].

Скорость и характер протекания коррозионного процесса в железобетонных конструкциях зависит от множества таких случайных факторов, как природа, химический состав и степень концентрации агрессивной среды; проектный состав бетона; толщина защитного слоя и наличие трещин; особенности эксплуатации и др. Учесть все эти факторы детерминированными методами затруднительно, особенно для конструкций, находящихся в многолетней эксплуатации в условиях агрессивной среды. Для таких конструкций риск отказа на 2–3 по-

рядка выше проектного и при детерминированном подходе он остается неопределенным. Поэтому оценка напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений и расчет их долговечности должны рассматриваться в вероятностной постановке.

Основные теоретические положения расчета прочности и долговечности конструкций, взаимодействующих с окружающей средой, изложены в работе [12]. Общая постановка задачи расчета долговечности железобетонных конструкций сформулирована Л.М. Пухонто [14]. Основные расчетные параметры вероятностной модели долговечности — резерв несущей способности как случайная функция времени, интенсивность (скорость) износа и вероятность отказа конструкции как мера ее надежности. Срок службы конструкции определяется временем достижения приемлемой вероятности отказа.

Практическая реализация вероятностно-статистического подхода к оценке долговечности при воздействии агрессивной среды предполагает разработку соответствующих инженерных методик. Так, в работе [14] в вероятностной постановке рассмотрены методы оценки и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций силосов, бункеров, резервуаров и др. с учетом дефектов и повреждений в бетоне и арматуре при работе в различных агрессивных средах. Вероятностный расчет глубины и скорости карбонизации бетона в конструкциях с течением времени для условий Беларуси приведен в [6]. Задача вероятностного моделирования поведения железобетонных мостовых конструкций при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды рассмотрена в [13]. Вместе с тем в настоящее время большинство задач расчета долговечности, отражающих вероятностную природу работы железобетонных конструкций, только поставлены и еще не получили необходимых для практики решений. Разработка этих задач представляет собой важную и актуальную проблему.

В настоящей статье представлена методика вероятностного расчета долговечности железобетонных балок и ее приложение к решению практической задачи оценки ресурса железобетонных конструкций промышленного здания на основе данных экспериментально-диагностических исследований.

Решены следующие задачи:

- получена функция распределения резерва прочности прямоугольного железобетонного сечения с двойной арматурой с учетом скорости коррозионного износа бетона и арматуры;
- по результатам натурного обследования технического состояния несущих конструкций промышленного здания определено НДС наиболее поврежденных коррозией конструкций с учетом фактических значений прочности материала, гео-

метрических характеристик сечений и перераспределения усилий;

- проведен расчет остаточного ресурса железобетонных балок как отдельных элементов, так и с учетом их работы в системе с поэлементным резервированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика действующего промышленного здания и условий эксплуатации несущих конструкций

Объект исследования представляет собой трехэтажную открытую этажерку с размерами 30×15 м в плане и высотой 25 м [15]. Основные несущие конструкции (колонны, ригели продольных рам, второстепенные балки и плиты перекрытия) первого и второго этажа сборные железобетонные, третьего этажа — металлические. На момент обследования сооружение эксплуатируется 30 лет. Общий вид сооружения представлен на рис. 1.

Сбор нагрузок на здание выполнялся по проектной документации и фактическому расположению оборудования.

Основные несущие конструкции находятся в условиях непосредственного воздействия внешней среды. Конструкции перекрытия замачиваются регулярно проливаемой оборотной водой, компоненты которой являются агрессивными по отношению к арматуре и бетону [15].



Рис. 1. Общий вид сооружения

Fig. 1. General view of the structure

Результаты натурного технического обследования железобетонных балок междуэтажных перекрытий

При проведении обследования технического состояния основных несущих конструкций сооружения установлено:

- наибольшие коррозионные повреждения, относящиеся к III–IV категории технического состо-

яния [16], имеются в железобетонных балках перекрытия первого этажа Б-4 и Б-18 (рис. 2);

- развитие коррозионного поражения бетона и арматуры происходит преимущественно в местах наибольших растягивающих напряжений в бетоне;
- толщина защитного слоя бетона исследуемых балок перекрытия составляет 2,9–3,5 см; глубина нейтрализованного слоя бетона — 5,1–6,1 см;
- определение фактической (остаточной) прочности бетона $R_b^{\text{ост}}$ производилось методами неразрушающего контроля (ультразвуковой, механический). Прочность бетона сжатой зоны балки соответствует $R_{bn} = 11$ МПа.

Проектные и фактические площади бетона и арматуры балок приведены в табл. 1.

Для статически неопределимых систем по мере увеличения коррозионного износа отдельных конструкций идет перераспределение усилий в систе-

ме. Поэтому работу поврежденных конструкций рассматриваем с учетом НДС сооружения в целом.

После проведения обследования для общего понимания фактической работы конструкций сооружения и создания расчетной схемы в ПК ЛИРА была создана 3D-модель сооружения в программе Autodesk Revit с учетом полученных данных (рис. 3).

Методика расчета ресурса железобетонных балок с учетом коррозионных повреждений

Рассматриваются наиболее поврежденные коррозией железобетонные балки типа Б-4, Б-18 (рис. 2) прямоугольного сечения с двойной арматурой.

При оценке их надежности используем следующие предварительные условия.

1. Рассматриваемые коррозионные повреждения балок не приводят к снижению сцепления арматуры с бетоном.

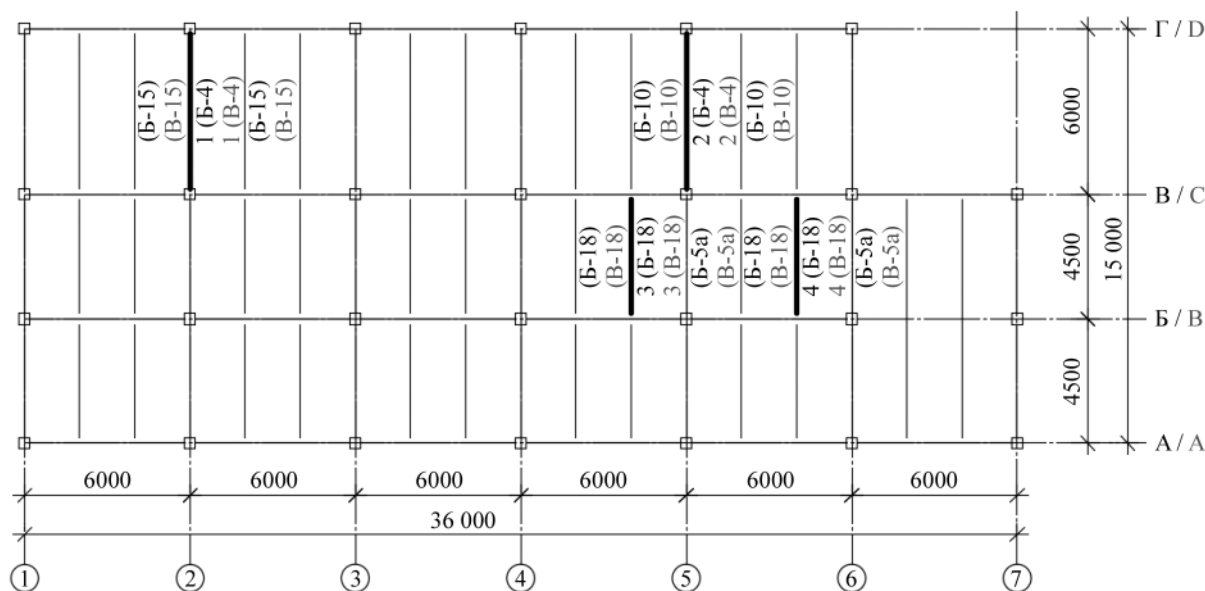


Рис. 2. Схема расположения наиболее поврежденных балок в уровне первого этажа

Fig. 2. The layout of the most damaged beams at the first floor level

Табл. 1. Площади бетона и арматуры наиболее поврежденных балок

Table 1. Areas of concrete and reinforcement of the most damaged beams

Номер балки (см. рис. 2) Beam number (Fig. 2)	Площадь арматуры, см ² Rebar area, cm ²		Площадь бетона, см ² Concrete area, cm ²	
	Проектная Project	Фактическая с учетом остаточного диаметра Actual taking into account the residual diameter	Проектная Project	Фактическая в зоне максимальных моментов Actual in the zone of maximum moments
1 Б-4 / В-4	10,3	7,44	1800	1690
2 Б-4 / В-4	10,3	7,16	1800	1710
3 Б-18 / В-18	30,5	20,4	1800	1680
4 Б-18 / В-18	30,5	14,3	1800	1740

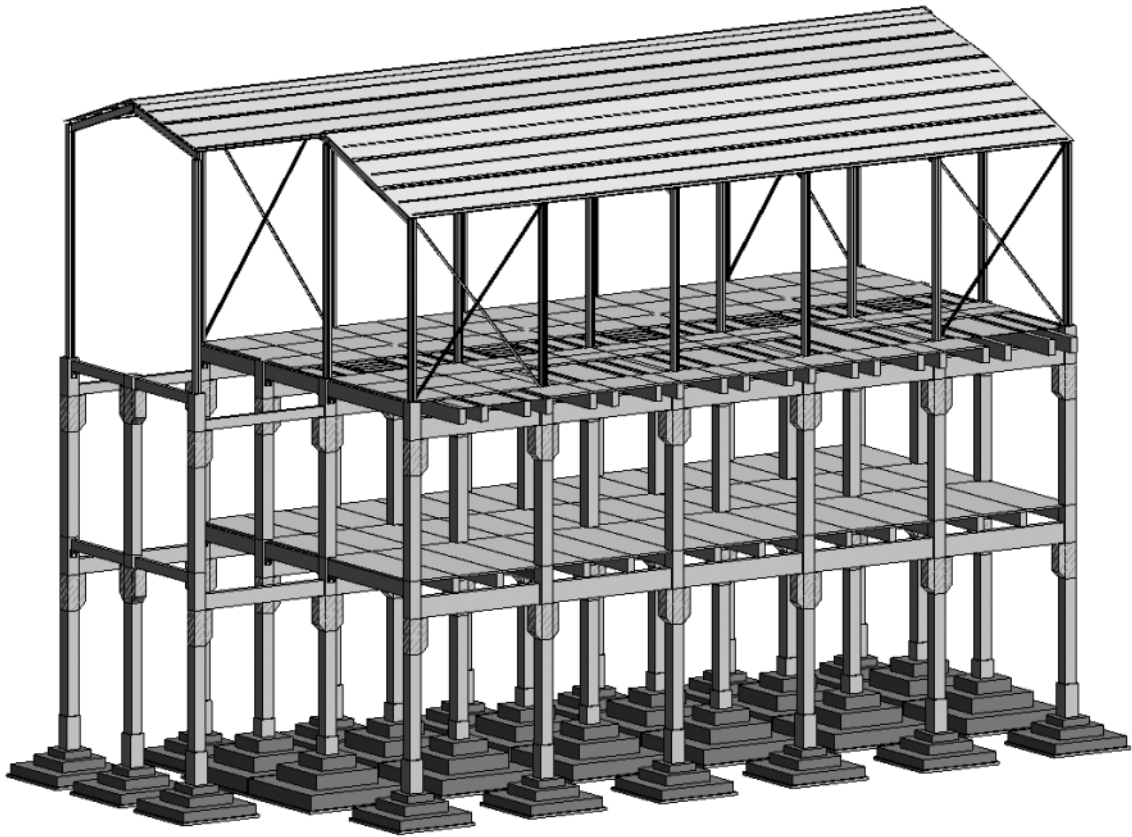


Рис. 3. 3D-модель здания

Fig. 3. 3D-model of the building

2. Принимаем линейную модель коррозионного износа как для рабочей арматуры после истечения защитных свойств бетона, так и для бетона сжатой зоны.

3. Арматура сжатой зоны не подвергается воздействию коррозии.

4. Влияние напряженного состояния балок на характер коррозионного износа не рассматривается.

Согласно [5] несущую способность сечения железобетонной балки с двойной арматурой рассматриваем как нелинейную функцию двух независимых случайных аргументов — прочности бетона $\tilde{R}_b$ и прочности арматуры $\tilde{R}_s$:

$$\tilde{m}(\tilde{R}_b, \tilde{R}_s) = \tilde{R}_s \left[(\mu - \mu') + \mu' \frac{h_a}{h_0} \right] - 0,5(\mu - \mu')^2 \frac{\tilde{R}_s^2}{\tilde{R}_b}, \quad (1)$$

где $\tilde{m}(\tilde{R}_b, \tilde{R}_s) = \frac{M_{np}}{bh^2}$ — относительный предельный изгибающий момент; b, h_0 — ширина и рабочая высота сечения; h — высота балки; μ, μ' — коэффициенты армирования в сжатой и растянутой зонах; h_a — расстояние от сжатой грани до центра тяжести сжатой арматуры.

Функция распределения предельной несущей способности:

$$P_m(m) = \int_{\Omega} p_b(R_b) p_s(R_s) dR_b dR_s = \int_0^{\infty} p_b(R_b) P_s[R_s(R_b)] dR_b, \quad (2)$$

где Ω — область отказа; $p_b(R_b), p_s(R_s)$ — плотности распределения пределов прочности бетона и арматуры; $P_s[R_s(R_b)] = \int_0^{R_s(R_b, m)} p_s[R_s(R_b, m)] dR_s$ — интегральная функция распределения предела текучести арматуры при заданном m .

Для учета коррозионного износа вводим функции $\varphi_b(\tau) = (1 - \tau V_b)$, $\varphi_s(\tau) = (1 - \tau V_s)$, рассматривая скорости V_b и V_s постоянными. Принимаем случайные параметры $\tilde{R}_b$ и $\tilde{R}_s$ нормально распределенными.

Тогда функцию (2) запишем в виде:

$$P_m(m, \tau) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b(\tau)} e^{-u_b^2(\tau)} \Phi[u_s(\tau)] dR_b. \quad (3)$$

Обозначения в формуле (3):

$$u_b(\tau) = \frac{R_b - \bar{R}_b \varphi_b(\tau)}{\sigma_b(\tau)} = \frac{R_b - \bar{R}_b \varphi_b(\tau)}{\bar{R}_b \varphi_b(\tau) f_b}; \quad (4)$$

где $\bar{R}_b, \sigma_b, f_b$ — математическое ожидание стандарт и коэффициент вариации прочности бетона;

$$u_s(\tau) = \frac{R_s(R_b, m) - \bar{R}_s \varphi_s(\tau)}{\bar{R}_s \varphi_s(\tau) f_s}, \quad (5)$$

где $\bar{R}_s$, φ_s , f_s — математическое ожидание стандарт и коэффициент вариации предела текучести арматуры; Φ — функция Лапласа.

Функция $R_s(R_b, m)$ выражается через R_b и m в зависимости от характеристики сжатой зоны: при $\xi \leq \xi_R$

$$R_s(R_b, m) = R_b \frac{\theta}{\mu - \mu'} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m}{R_b \theta^2}} \right), \quad (6)$$

где $\theta = \frac{\mu - \mu' h_0 - h_a/h_0}{\mu - \mu'}$;

при $\xi > \xi_R$

$$R_s(R_b, m) = \frac{m - \xi_R (1 - 0,5 \xi_R) R_b}{\mu' h_a/h_0}, \quad (7)$$

принимая $\xi_R = 0,55$ [5].

Оценка скорости коррозионных повреждений бетона и арматуры производилась экспериментально. Период полной нейтрализации защитного слоя бетона определялся путем использования химических индикаторов. Измерения проводились в зонах сохранившегося бетона (вблизи нейтральной оси).

Время до исчерпания защитных функций бетона τ_1 :

$$\tau_1 = \left(\frac{y_1}{y_2} \right)^2 \cdot \tau_2, \quad (8)$$

где y_1 — толщина защитного слоя бетона; y_2 — глубина нейтрального слоя бетона на момент проведения обследования; τ_2 — время в годах от момента начала эксплуатации до момента обследования.

Оценка скорости коррозионного износа растянутой арматуры проводилась путем натурного измерения площади оставшейся арматуры:

$$V_s = \frac{A_s - A_s^{\text{ост}}}{(\tau_2 - \tau_1) A_s}, \quad (9)$$

где $A_s^{\text{ост}}$ — оставшаяся площадь арматуры в наиболее нагруженном сечении.

Оценка скорости коррозионного износа бетона сжатой зоны:

$$V_b = \frac{A_b - A_b^{\text{ост}}}{(\tau_2 - \tau_1) A_b}, \quad (10)$$

где A_b — начальная площадь бетона; $A_b^{\text{ост}}$ — остаточная площадь сечения бетона с учетом фактически поврежденного слоя бетона.

Для решения задачи оценки остаточного ресурса рассматриваемой изгибаемой конструкции запишем уравнение резерва прочности [17, 18]:

$$\tilde{S}(\tau) = \tilde{m}_{\text{пр}}(\tau) - \tilde{m}_Q, \quad (11)$$

где $\tilde{m}_{\text{пр}}(\tau)$ — случайная величина предельного изгибающего момента в сечении; $\tilde{m}_Q$ — случайная величина момента в сечении от действующей нагрузки с параметрами $\bar{m}_Q$ и σ_Q .

Величины $\tilde{m}_{\text{пр}}(\tau)$ и $\tilde{m}_Q$ приняты нормально распределенными.

Отказ конструкции наступает при $S(\tau) = 0$.

Вероятность отказа:

$$V(\tau) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} p_m(m_{\text{пр}}, \tau) \Phi[u_Q(m_{\text{пр}}, \tau)] dm_{\text{пр}},$$

$$u_Q(m_{\text{пр}}, \tau) = \frac{m_{\text{пр}}(\tau) - \bar{m}_Q}{\sigma_Q}, \quad (12)$$

В отличие от проектирования при оценке остаточного ресурса эксплуатируемой конструкции мы имеем вполне определенные ее расчетные параметры: размеры сечения, армирование, класс бетона и арматуры. Это позволяет для рассматриваемой балки перейти к одномерной плотности вероятности $p_m(m_{\text{пр}})$. Расчет проводим методом статистических испытаний [19] по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{\text{пр}}(\tau) &= \xi(1 - 0,5\xi)(1 - \tau V_b) \times \\ &\times R_{bn} b h_0^2 + R_{sc} A_{sc} \left(h_0 - \frac{x}{2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где ξ — относительная высота сжатой зоны бетона; R_{bn} — нормативная прочность бетона; b , h_0 — ширина и рабочая высота сечения.

Как показывают результаты моделирования, закон распределения $p_m(m_{\text{пр}}, \tau)$ близок к нормальному для всех принятых $\tau = t_1, t_2, \dots, t_n$. Находим характеристики случайной величины $\tilde{m}_{\text{пр}}(\tau)$ — математическое ожидание $\bar{m}_{\text{пр}}(\tau)$ и стандарт $\sigma_m(\tau)$, а также функцию распределения $P_m(m_{\text{пр}})$ и резерв прочности (11). Задаем вероятность отказа V и находим время от момента исчерпания защитных функций бетона до наступления предельного состояния $\tau = \tau_3$. Тогда остаточный ресурс конструкции $Res(V, T)$ представляет собой время от момента ее обследования до наступления предельного состояния $T = \tau_3 - (\tau_2 - \tau_1)$ с гарантируемой безопасностью $(1 - V)$.

Методика оценки ресурса балок, работающих в системе

Анализ пространственной расчетной схемы сооружения показал, что каждая из рассматриваемых балок имеет по одному резервному элементу. После отказа балок Б-4, Б-18 происходит перераспределение усилий на соседние балки Б-5а, Б-10, Б-15, Б-18 (рис. 2), которые приняты резервными. При этом резервные балки еще имеют небольшой запас несущей способности. После отказа резервных балок происходит разрушение соответствующих соседних балок. При расчете системы, состоящей из наиболее поврежденных и резервных балок, за основу была принята структурная схема надежности с поэлементным резервированием [20]. Схема поэлементного резервирования приведена на рис. 4.

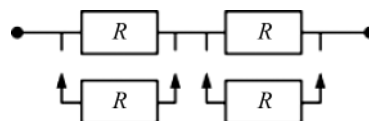


Рис. 4. Структурная схема надежности с поэлементным резервированием

Fig. 4. Block scheme of reliability with element-by-element redundancy

Среднее время безотказной работы системы вычисляем по формуле:

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (14)$$

где n — число основных элементов; T_i — время безотказной работы i -го элемента, которое принимается по результатам расчета отдельных балок.

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c = \frac{1}{T_c}. \quad (15)$$

Кратность резервирования:

$$m = \frac{R}{n}, \quad (16)$$

где R — число резервных элементов.

Частота отказов системы:

$$f_c = \lambda_c \cdot (m+1) \cdot e^{-\lambda_c \cdot t} \cdot (1 - e^{-\lambda_c \cdot t})^m, \quad (17)$$

где t — длительность эксплуатации конструкции после истощения бетоном защитной функции на момент проведения обследования.

Вероятность безотказной работы системы:

$$P_c = 1 - (1 - e^{-\lambda_c \cdot t})^{m+1}. \quad (18)$$

Результаты расчета системы сведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема коррозионных повреждений и место их расположения в балках типа Б-18 приведена на рис. 5.

Находим основные параметры коррозионного износа бетона и арматуры для балки Б-18:

- время эксплуатации объекта до момента проведения обследования составляет $\tau_2 = 30$ лет;
- при средних значениях толщины защитного слоя бетона $y_1 = 3,2$ см и глубины нейтрального слоя бетона $y_2 = 5,6$ см время до истощения бето-

ном защитных свойств по отношению к арматуре $\tau_1 = 10$ лет [15];

- время эксплуатации конструкции после истощения бетоном защитной функции $\tau_2 - \tau_1 = 20$ лет;
- скорость коррозионного износа растянутой арматуры $V_s = 2,65$ % в год;
- скорость коррозионного износа бетона сжатой зоны $V_b = 0,33$ % в год.

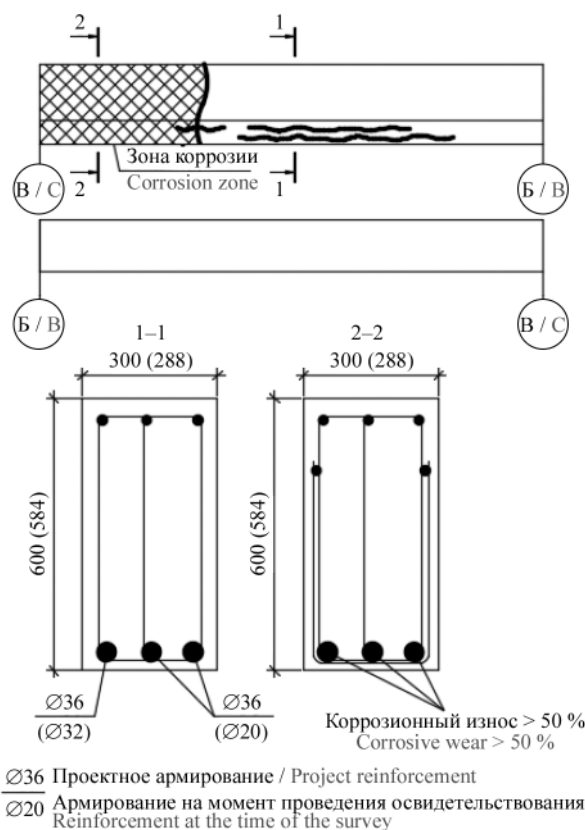


Рис. 5. Схема армирования и зоны коррозионных повреждений в балках типа Б-18 (в осях 5–6/Б–В)

Fig. 5. Reinforcement scheme and corrosion damage zones in beams of type B-18 (in axes 5–6/B–C)

Табл. 2. Результаты расчета надежности исследуемых железобетонных балок

Table 2. The results of calculating the reliability of the studied reinforced concrete beams

Номер элемента Item Number	Средний предельный момент $\bar{m}_{\text{пр}}$, кН·м Average limiting moment $\bar{m}_{\text{lim}}$, kN·m	Средний момент от действующей нагрузки $\bar{m}_Q$, кН·м Average torque from the current load $\bar{m}_Q$, kN·m	Коэффициент вариации по прочности $k_{\text{пр}}$ Coefficient of variation in strength k_{lim}	Коэффициент вариации по нагрузке k_Q Coefficient of variation in load k_Q	Средний резерв прочности S , кН·м Average strength reserve S , kN·m	Стандарт резерва прочности σ_s , кН·м Strength Reserve standard σ_s , kN·m	Индекс надежности β Reliability index β
1	187,61	101,77	0,09	0,18	85,84	24,91	3,45
2	180,46	101,07	0,09		79,38	24,39	3,26
3	450,18	178,28	0,11		271,90	59,01	4,61
4	344,18	183,19	0,11		160,99	50,21	3,21

В табл. 3 приведены основные расчетные характеристики балок.

График изменения математического ожидания предельного изгибающего момента во времени с момента исчерпания бетоном защитных свойств по от-

ношению к арматуре в зависимости от степени повреждения бетона и арматуры показан на рис. 6. При проведении статистического моделирования принят шаг во времени один год. Момент наступления отказа соответствует значению резерва прочности $\tilde{S}(\tau) = 0$,

Табл. 3. Основные характеристики наиболее поврежденных балок

Table 3. Main characteristics of the most damaged beams

Балка Beam				Армирование Reinforcement	Проектная нормативная прочность Design normative strength	Нормативная прочность с учетом дефектов Normative strength taking into account defects	Нормативный момент от внешних нагрузок Regulatory moment from external loads
Марка Stamp	Отметка Mark	Расположение Location	Кол-во Quantity	Верхняя зона/нижняя зона Upper zone/lower zone	m_{np} , кН·м m_{lim} , N·m	m_{np} , кН·м m_{lim} , N·m	m_o , кН·м kN·m
Б-4, Б-4а B-4, B-4a	+7,000	1-6/Г-В 1-6/D-C	6	3Ø10/3Ø20	215	160	132
Б-5, Б-5а B-5, B-5a	+7,000	1-6/А-В 1-6/A-C	12	3Ø10/3Ø20	215	215	46
Б-10 / B-10	+7,000	4-6/В-Г 4-6/C-D	4	3Ø10/6Ø25	375	375	274
Б-15 / B-15	+7,000	1-4/В-Г 1-4/C-D	6	3Ø14/6Ø25	394	394	274
Б-18 / B-18	+7,000	1-6/Б-В 1-6/B-C	10	3Ø10/3Ø36	488	282	237

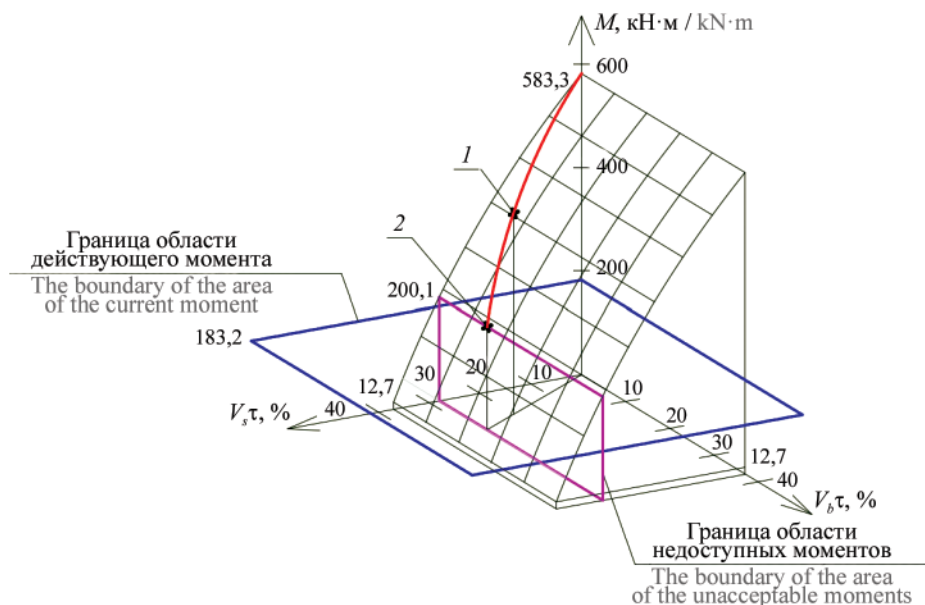


Рис. 6. Средний предельный изгибающий момент (13) в нормальном сечении железобетонной балки Б-18 в зависимости от величины коррозионного износа бетона сжатой зоны и растянутой: 1 — состояние, соответствующее времени обследования; 2 — состояние отказа

Fig. 6. The average limiting bending moment in the normal section of the reinforced concrete beam B-18, depending on the magnitude of corrosion wear of the concrete of the compressed zone and the stretched reinforcement: 1 — the condition corresponding to the time of examination; 2 — the condition of failure

Табл. 4. Результаты расчета надежности системы

Table 4. The results of calculating the reliability of the system

Номер элемента Item Number	Время безотказной работы элемента T_f , год Time to element failure T_f , year	Время безотказной работы системы T_s , год Time to system failure T_s , year	Интенсивность отказов системы λ_s , 1/год System failure rate λ_s , 1/year	Число резервных элементов R , шт. Number of backup elements R , pc	Число основных элементов n , шт. Number of main elements n , pc	Кратность резервирования m Redundancy rate m	Частота отказов системы f_s System failure rate f_s	Вероятность безотказной работы системы P_s Probability of system success P_s
1	25	20	0,0494	4	4	1	0,0231	0,606
2	21							
3	27							
4	8							

или $\beta(\tau) = 0$. На момент времени — 28 лет — средний момент от нагрузки $\bar{m}_0 = 183,2$ кН·м, средний предельный изгибающий момент $\bar{m}_{пр} = 200,1$ кН·м, индекс надежности $\beta = 0,44$. На момент времени — 29 лет — указанные выше параметры соответственно принимают значения $\bar{m}_0 = 183,2$ кН·м, предельный изгибающий момент $\bar{m}_{пр} = 181,2$ кН·м, индекс надежности $\beta = -0,05$.

Результаты вероятностного расчета балок 1–4 сведены в табл. 2. Для каждой балки вычислен индекс надежности β , соответствующий времени обследования. Табл. 4 содержит средние показатели ресурса отдельных балок и системы в целом при $\beta = 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В вероятностной постановке решена задача оценки остаточного ресурса железобетонных балок трехэтажной открытой этажерки с учетом коррозионного износа растянутой арматуры и сжатой зоны бетона. Показатель ресурса определялся как функция двух параметров: наработки T и вероятности того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто.

Скорость коррозионного износа вычислялась интегрально по установленным на момент времени проведения обследования остаточным площадям арматуры и бетона. Учитывая отсутствие данных предыдущих обследований балок, принята линейная модель коррозионного износа.

Коррозионный износ арматуры и бетона исследуемых конструкций приводит к изменению напряженно-деформированного состояния конструкций здания. Поэтому расчет здания в целом проводился с учетом повреждений исследуемых конструкций.

Вероятностные характеристики предельного изгибающего момента в наиболее нагруженном сечении балки найдены методом Монте-Карло на основе нормативного метода расчета прямоугольного железобетонного сечения с двойной арматурой. Случайные параметры входа — прочность бетона и прочность арматуры.

На момент проведения обследования срок эксплуатации сооружения составлял 30 лет, из которых в течение 20 лет проходило накопление коррозионных повреждений. Для наиболее поврежденной балки Б-18 поражение растянутой арматуры для всех стержней составило ≈ 53 %, бетона сжатой зоны в зоне максимальных моментов — 6–10 %. Математическое ожидание предельного изгибающего момента $\bar{m}_{пр} = 344,18$ кН·м, коэффициент вариации $k_{мпр} = 0,11$. При средней нагрузке на балку $\bar{m}_0 = 183,19$ кН·м индекс надежности равен $\beta = 3,21$, что соответствует вероятности отказа $V = 6,637 \cdot 10^{-4}$.

При постоянной скорости износа бетона $V_b = 0,33$ % в год и арматуры $V_s = 2,65$ % в год среднее время до наступления отказа (при $\beta = 0$ и $V = 0,5$) $T = 8$ лет. Для $\beta = 1,64$ время наработки до отказа балки Б-18 (балка № 4, см. рис. 2) составляет $T = 5$ лет с гарантируемой безопасностью 0,95. Время наработки на отказ балок № 1–3 (см. рис. 2) соответственно $T_1 = 15$ лет, $T_2 = 11$ лет, $T_3 = 20$ лет.

Следует отметить, что результаты расчета остаточного ресурса получены на основе статистических характеристик исходного состояния балки, которые оценивались по проектным данным, и диагностических данных об их состоянии через 30 лет эксплуатации. При наличии промежуточных данных диагностирования повреждений, используя приведенную методику расчета, можно уточнить модель коррозионного износа и, соответственно, время наработки T . Очевидно, что решение получено в запас надежности [21].

На момент проведения освидетельствования железобетонный постамент частично исчерпал свой ресурс, адаптировался к внешним воздействиям и находится в работоспособном состоянии в стадии равномерного ускоренного износа. При этом, учитывая, что остальные несущие конструкции находятся в удовлетворительном состоянии, то по результатам расчета балок, работающих как система с поэлементным резервированием, вероятность безотказной работы объекта составляет $P_s = 0,606$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang M., Nishiya N., Akiyama M., Lim S., Masuda K. Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. P. 120678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120678
2. Kumar V.N., Ronald Joseph J.D., Ashok M., Suresh M.P. An experimental study on assessing the corrosion performance of steel reinforcement for the durability of concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 989. Issue 1. P. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/989/1/012025
3. Zhang Y., Ge Huang J., Shu Liu J. Study on the influence of reinforcement corrosion on concrete safety factors // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 719. Issue 2. P. 022007. DOI: 10.1088/1755-1315/719/2/022007
4. Sahare S., Karkare B. RBF-Slip behaviour of reinforced concrete elements subjected to corrosion of rebar // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13. P. e00420. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00420
5. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений : научное издание. М. : Изд-во АСВ, 2010. 384 с.
6. Леонович С.Н., Чернякевич О.Ю. Вероятностная модель карбонизации железобетонных конструкций // *Наука и техника*. 2012. № 5. С. 57–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23146305>
7. Oki M., Akintola S.A., Adediran A.A., Ikubanni P.P., Ogunsemi B.T. Reinforcement bar corrosion — causes and management // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1378. Issue 2. P. 022095. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022095
8. Латыпов В.М., Анваров А.Р., Федоров П.А., Луцкы Е.В., Дербинян Г.К. Математическое моделирование процессов коррозии как основа реформирования норм агрессивности эксплуатационной среды по отношению к бетону и железобетону // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 67–71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27390553>
9. Hackl J., Kohler J. Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks // *Structural Safety*. 2016. Vol. 62. Pp. 12–23. DOI: 10.1016/j.strusafe.2016.05.005
10. Zheng B. Modeling and verification of corrosion expansion crack in reinforced concrete // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 300. Issue 2. P. 022058. DOI: 10.1088/1755-1315/300/2/022058
11. Nepal J., Chen H.-P. Assessment of concrete damage and strength degradation caused by reinforcement corrosion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 628. P. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/628/1/012050
12. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Саратов : Изд-во Саратов. Ун-та, 1987. 288 с.
13. Овчинников И.И., Чэнь Тао, Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях эксплуатации // *Транспортные сооружения*. 2017. Т. 4. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf> DOI: 10.15862/03TS417
14. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен). М. : Изд-во АСВ, 2004. 424 с.
15. Гриценко Б.С., Пшеничкина В.А., Халап Н.Н., Глухов А.В. Оценка остаточного ресурса железобетонных балок промышленного здания при коррозионном износе // *Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 7–8 декабря 2021 г.) : в 2 ч. Часть 1*. Волгоград, 2021. С. 60–69. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48090788>
16. Добромислов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам : справочное пос. М. : Изд-во АСВ, 2004. 72 с.
17. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.
18. Острейковский В.А. Теория надежности : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 2003. 463 с.
19. Москвитина А.В., Феоктистова М.В., Толстых О.Д. Реализация метода Монте-Карло при исследовании случайных процессов // *Молодая наука Сибири*. 2020. № 3(9). С. 258–266. URL: <https://mnv.irkgups.ru/realizaciya-metoda-monte-karlo-pri-issledovanii-sluchaynyh-processov>
20. Корчагин А.Б., Сердюк В.С., Бокарев А.И. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие : в 2 ч. Ч. 1: Основы теории. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. 228 с.
21. Gravit M., Korolkov D., Reshetnikova I. Combined method of calculation of the residual life of building structures // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 265. P. 05023. DOI: 10.1051/mateconf/201926505023

Поступила в редакцию 10 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерия Александровна Пшеничкина** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; var_hm@list.ru;

Борис Степанович Гриценко — доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 843670, Scopus: 57219265762; gbst@inbox.ru;

Антон Викторович Глухов — аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 833192, Scopus: 57219268897; tracketbow@list.ru;

Виктория Викторовна Габова — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 558554, Scopus: 57197733019; gabovavv@yandex.ru;

Максим Евгеньевич Дубовский — аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1036410, Scopus: 57219267207; chedmax@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhang M., Nishiya N., Akiyama M., Lim S., Masuda K. Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams. *Construction and Building Materials*. 2020; 264:120678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120678
2. Kumar V.N., Ronald Joseph J.D., Ashok M., Suresh M.P. An experimental study on assessing the corrosion performance of steel reinforcement for the durability of concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 989(1):012025. DOI: 10.1088/1757-899X/989/1/012025
3. Zhang Y., Ge Huang J., Shu Liu J. Study on the influence of reinforcement corrosion on concrete safety factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 719(2):022007. DOI: 10.1088/1755-1315/719/2/022007
4. Sahare S., Karkare B. RBF-Slip behaviour of reinforced concrete elements subjected to corrosion of rebar. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00420. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00420
5. Raiser V.D. *Theory of reliability of structures : Scientific publication*. Moscow, Publishing House DIA, 2010; 384.
6. Leonovich S.N., Chernyakevich O.Y. Probability model for carbonization of reinforced concrete structures. *Science and Technology: International Scientific and Technical Journal*. 2012; 5:57-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23146305> (rus.).
7. Oki M., Akintola S.A., Adediran A.A., Ikubani P.P., Ogunsemi B.T. Reinforcement bar corrosion — causes and management. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1378(2):022095. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022095
8. Latypov V.M., Anvarov A.R., Fedorov P.A., Lutsyk E.V., Derbinyan G.K. Mathematical simulation of corrosion processes as a basis for reforming norms of aggressiveness of operational environment with regard to concrete and reinforced concrete. *Construction Materials*. 2016; 10:67-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27390553> (rus.).
9. Hackl J., Kohler J. Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks. *Structural Safety*. 2016; 62:12-23. DOI: 10.1016/j.strusafe.2016.05.005
10. Zheng B. Modeling and verification of corrosion expansion crack in reinforced concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 300(2):022058. DOI: 10.1088/1755-1315/300/2/022058
11. Nepal J., Chen H.-P. Assessment of concrete damage and strength degradation caused by reinforcement corrosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015; 628:012050. DOI: 10.1088/1742-6596/628/1/012050
12. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shi-khov Yu.M. *Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment*. Saratov University Publishing House, 1987; 288. (rus.).

13. Ovchinnikov I.I., Chen Tao, Ovchinnikov I.G. Probabilistic modeling of behavior of reinforced bridge structures in aggressive operating conditions. *Transport Structures*. 2017; 4(4). URL: <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf>. DOI: 10.15862/03TS417 (rus.).
14. Pukhonto L.M. *Durability of reinforced concrete structures of engineering structures (silos, bunkers, reservoirs, water towers, retaining walls)*. Moscow, ASV Publ., 2004; 424. (rus.).
15. Gritsenko B.S., Pshenichkina V.A., Khalap N.N., Glukhov A.V. Evaluation of the residual resource of reinforced concrete beams of an industrial building under corrosion wear. *Actual problems and prospects of development of the construction complex : proceedings of the International Scientific and Practical Conference : in 2 parts. Part 1. Volgograd, 2021*. 2021; 1:60-69. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48090788> (rus.).
16. Dobromyslov A.N. *Assessment of the reliability of buildings and structures by external signs : reference manual*. Moscow, Publishing House DIA, 2004; 72. (rus.).
17. Rzhantsyn A.R. *Theory of calculation of building structures for reliability*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 239. (rus.).
18. Ostreikovsky V.A. *Theory of reliability : textbook for universities*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003; 463. (rus.).
19. Moskvitina A.V., Feoktistova M.V., Tolstykh O.D. Implementation of the Monte-Carlo method in research random process. *Young Science of Siberia*. 2020; 3(9):258-266. URL: <https://mnv.igups.ru/realizaciya-metoda-monte-karlo-pri-issledovanii-sluhaynyh-processov> (rus.).
20. Korchagin A.B., Serdyuk V.S., Bokarev A.I. *Reliability of technical systems and technogenic risk : studies. manual : in 2 hours. Part 1: Fundamentals of theory*. Omsk, Publishing House of OmSTU, 2011; 228. (rus.).
21. Gravit M., Korolkov D., Reshetnikova I. Combined method of calculation of the residual life of building structures. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 265:05023. DOI: 10.1051/mateconf/201926505023

Received November 10, 2022.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S : **Valeria A. Pshenichkina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Boris S. Gritsenko — Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 843670, Scopus: 57219265762; gbst@inbox.ru;

Anton V. Glukhov — Postgraduate student of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 833192, Scopus: 57219268897; tracketbow@list.ru;

Victoria V. Gabova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 558554, Scopus: 57197733019; gabovavv@yandex.ru;

Maxim E. Dubovsky — postgraduate student of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University (IAiS VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1036410, Scopus: 57219267207; chedmax@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555

Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов

Азиз Рамизович Сафаров, Владимир Богданович Дорожинский,
Владимир Игоревич Андреев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлена действующая нормативная методика учета физической нелинейности (диаграммы состояний) при расчете железобетонных конструкций. Рассматривается математическая модель бетона CSCM, реализованная в программном комплексе (ПК) LS-DYNA, описаны ее особенности, отмечены границы и способы применения по имеющимся данным. Численная модель имеет два способа ее реализации в расчетной модели: CSCM_CONCRETE — автоматический (на основе минимальных входных параметров бетона) и CSCM — ручной (ввод значительного числа входных параметров бетона). Проведено сравнение результатов расчетов обеих реализаций с экспериментальными данными, полученными для балок, выполненных по отечественным нормам.

Материалы и методы. Объекты исследования — бетонная и железобетонная балки. В качестве критерия оценки достоверности получаемых численных результатов приняты материалы экспериментальных данных, из которых в расчетной модели анализировались следующие параметры: разрушающая нагрузка, прогиб при разрушающей нагрузке, картина разрушения. Численные расчеты выполнены в ПК LS-DYNA, который позволяет проводить нелинейные динамические расчеты конструкций на различные виды нагрузок и воздействий, исследовать разрушение балок в экспериментах под нарастающими по величине нагрузками во времени.

Результаты. Использование модели CSCM по любой из ее реализаций для бетонных балок из бетона класса В20 не рекомендуется. Для железобетонных балок из бетона класса В30 обе реализации совпадают с экспериментальными данными, разница в результатах для обеих реализаций по разрушающей нагрузке составляет до 17 %. При этом более точной реализацией модели является ручная, для которой на сегодняшний день свойства бетона рационально вычислять по отдельной методике, упомянутой в тексте данной работы.

Выводы. Полученные численные результаты для железобетонной балки, выполненной из бетона класса В30, указывают на возможность применения модели CSCM в исследовании железобетонных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: LS-DYNA, CSCM, бетон, железобетон, сопротивление материалов, строительная механика, строительные конструкции, напряженно-деформированное состояние

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сафаров А.Р., Дорожинский В.Б., Андреев В.И. Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 545–555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555

Автор, ответственный за переписку: Азиз Рамизович Сафаров, emailuser@internet.ru.

Implementation of CSCM concrete numerical model for domestic concrete classes

Aziz R. Safarov, Vladimir B. Dorozhinskij, Vladimir I. Andreev

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

ABSTRACT

Introduction. The current normative procedure of accounting physical nonlinearity (state diagrams) in the calculation of reinforced concrete structures is presented. The mathematical model of concrete CSCM realized in the software package (PC) LS-DYNA is considered, its features are described, its limits and ways of its application are marked. The numerical model has two ways of its implementation in the calculation model: CSCM_CONCRETE – automatic (based on minimum input parameters of concrete) and CSCM – manual (input of a significant number of input parameters of concrete). Calculation results of both realizations have been compared with the experimental data obtained for beams made according to the domestic standards.

Materials and methods. The objects of the study are concrete and reinforced concrete beams. Experimental data have been taken as a criterion for estimating the reliability of the obtained numerical results. The following parameters have been analyzed in the calculation model: the breaking load, the deflection under the breaking load and the failure pattern. Numerical computations were carried out using the LS-DYNA software package that enables a nonlinear dynamic analysis of structures under different kinds of loads and stresses, and a study of beam collapse under increasing loads with time.

Results. It is not recommended to use CSCM model in any of its implementations for concrete beams made of B20 class concrete. For reinforced concrete beams made of class B30 concrete, both implementations coincide with the experimental data, the difference in the results for both implementations in terms of destruction load is up to 17 %. At the same time, a more accurate implementation of the model is a manual one, for which today it is rational to calculate the properties of concrete using a separate method mentioned in the text of this paper.

Conclusions. The numerical results obtained for a reinforced concrete beam made of B30 class concrete indicate the possibility of applying the CSCM model in the study of reinforced concrete structures.

KEYWORDS: LS-DYNA, CSCM, concrete, reinforced concrete, strength of materials, structural mechanics, building structures, stress-strain state

FOR CITATION: Safarov A.R., Dorozhinskij V.B., Andreev V.I. Implementation of CSCM concrete numerical model for domestic concrete classes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):545-555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555 (rus.).

Corresponding author: Aziz R. Safarov, emailuser@internet.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении расчетов в моделях (схемах) должны быть отражены действительные условия работы конструкций¹. Одним из способов достижения этого требования является применение современных математических моделей строительных материалов, учитывающих нелинейную работу. Действующие нормы РФ по железобетонным конструкциям² предлагают соответствующие диаграммы для отдельно взятого материала (бетон, арматурная сталь), описывающие работу каждого из материалов под нагрузкой за пределом упругости. Развитие вычислительных комплексов на данный момент позволяет моделировать объемные железобетонные конструкции с учетом совместной работы бетона и арматурной стали. Для реализации такого расчета в программном комплексе (ПК) LS-DYNA применяют численную модель бетона CSCM. При расчетах эту модель бетона возможно использовать в двух реализациях: CSCM_CONCRETE (автоматическая) и CSCM (ручная). Автоматическая основана на минимальном количестве свойств бетона, а ручная — на значительном количестве (около 40 шт.). В настоящем исследовании проводится сравнительный анализ применения двух реализаций для двух конструкций, выполненных из отечественных классов бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нормативные диаграммы σ – ϵ материалов

При расчетах железобетонных конструкций по нелинейно-деформационной модели применяются различные диаграммы состояния (деформирования) бетона и арматуры².

Для определения связи между напряжениями и относительными деформациями используют

диаграммы бетона следующих типов: кусочно-линейные (двухлинейные и трехлинейные, по типу Прандтля) (рис. 1) и криволинейные (рис. 2). Выбор диаграммы и величины на них определяются положениями норм², по которым практически во всех случаях выбирается двухлинейная или трехлинейная диаграмма деформирования, они упрощают выполнение расчетов. Условия применения криволинейной диаграммы не оговариваются.

Для арматурной стали так же применяются упрощенные диаграммы. Так, например, для арматуры с физическим пределом текучести (класс А240-А500, В500) — двухлинейная (рис. 3, а), для арматуры с условным пределом текучести

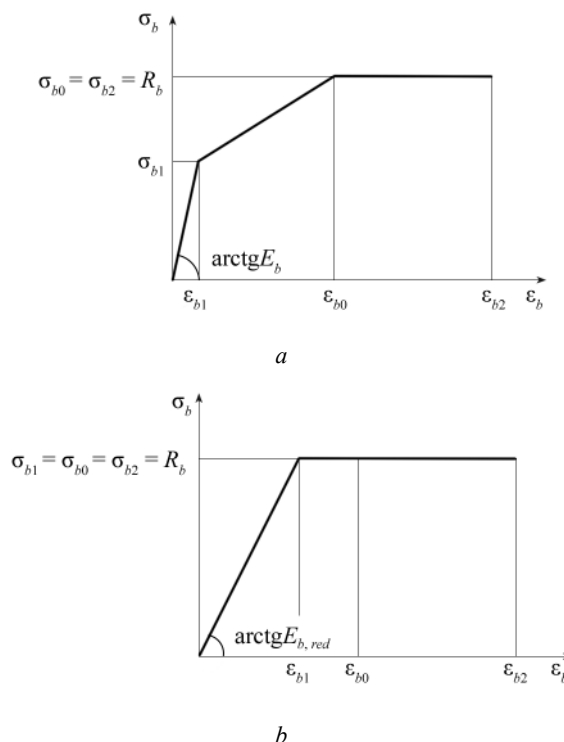


Рис. 1. Диаграммы состояния сжатого бетона²: а — трехлинейная; б — двухлинейная

Fig. 1. State diagrams of compressed concrete²: а — three-line; б — two-line

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ. М., 2009.

² СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01–2003. М., 2019.

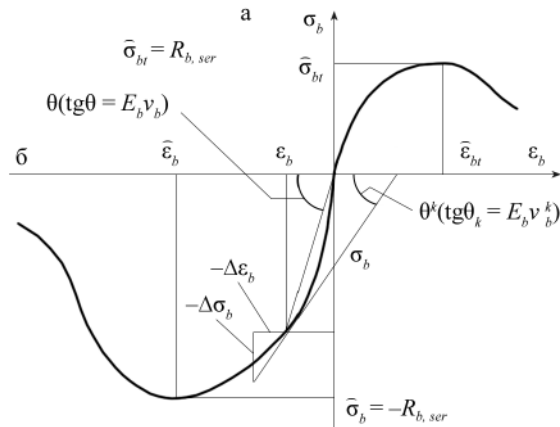


Рис. 2. Криволинейная диаграмма состояния бетона²

Fig. 2. Curvilinear concrete condition diagram²

(класс А600-А1000, В_р 1200-В_р 1500, К1400, К1500 и К1600) — трехлинейная (рис. 3, б), без учета упрочнения за площадкой текучести. Диаграммы деформирования арматурной стали при растяжении и сжатии принимаются одинаковыми с учетом нормируемых расчетных сопротивлений арматуры растяжению и сжатию. Также допускаются к применению криволинейные диаграммы состояния, аппроксимирующие фактические диаграммы деформирования арматурной стали. Величины на графиках определяются по нормам².

Приведенные выше диаграммы подразумевают работу материалов за пределом упругости (нелинейный характер), однако они получены для отдельно взятых материалов: бетон и арматурная сталь, при простых случаях нагружения. О том, как учитывается совместная работа обоих материалов, применяя данные диаграммы, в нормативных документах не оговаривается². В связи с этим возникает потребность в использовании других инструментов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, таких как компьютерное моделирование и численный анализ.

Численные модели материалов

С целью проведения численных исследований конструкций использовался ПК LS-DYNA, который позволяет проводить нелинейные и динамические расчеты с учетом совместной работы бетона и арматуры [1–10]. Для этого используется математическая модель бетона *MAT_CSCM³ (Continuous Surface Cap Model — модель с непрерывной поверхностью колпака) (рис. 4). Эта поверхность использует мультипликативную формулировку для плавного и непрерывного объединения поверхности

³ LS-DYNA. Keyword User's Manual. Volume II. Material Models (09/27/21). Livermore : Livermore Software Technology (LST), An Ansys Company, 2021. 1993 p.

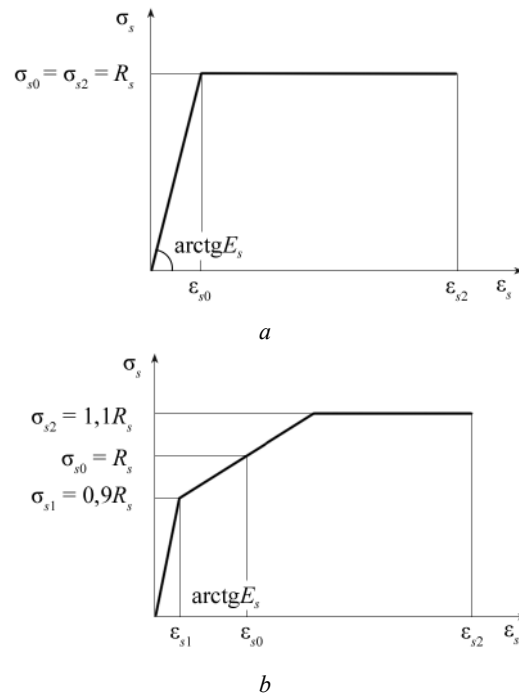


Рис. 3. Диаграммы состояния растянутой арматуры²:

а — двухлинейная; б — трехлинейная

Fig. 3. Tensile reinforcement state diagrams²: а — two-line; б — three-line

сдвига (разрушения) с поверхностью упрочнения (колпака). Гладкое пересечение устраняет числовые сложности обработки (вычисления) сжимаемой угловой области между поверхностью разрушения и колпаком⁴. Математическое описание модели подробно представлено в работах^{3, 4, 5}.

Основные особенности модели⁶:

- изотропные определяющие уравнения;
- трехинвариантная поверхность текучести с колпаком;
- изменчивость колпака, который расширяется и сжимается;
- размягчение на основе повреждений;
- эффект повышения прочности в случаях высоких скоростей деформаций.

Данную модель бетона можно реализовывать одним из следующих способов:

- автоматический (*MAT_CSCM_CONCRETE) — на основе минимального количества параметров выбранного класса бетона. При этом исходными данными для расчета являются: плотность бетона,

⁴ Murray Y.D. Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159. McLean : Federal Highway Administration, 2007. 92 p.

⁵ LS-DYNA. Theory Manual (07/24/19). Livermore: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2019. 886 p.

⁶ Murray Y.D., Abu-Odeh A., Bligh R. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. McLean : Federal Highway Administration, 2007. 209 p.

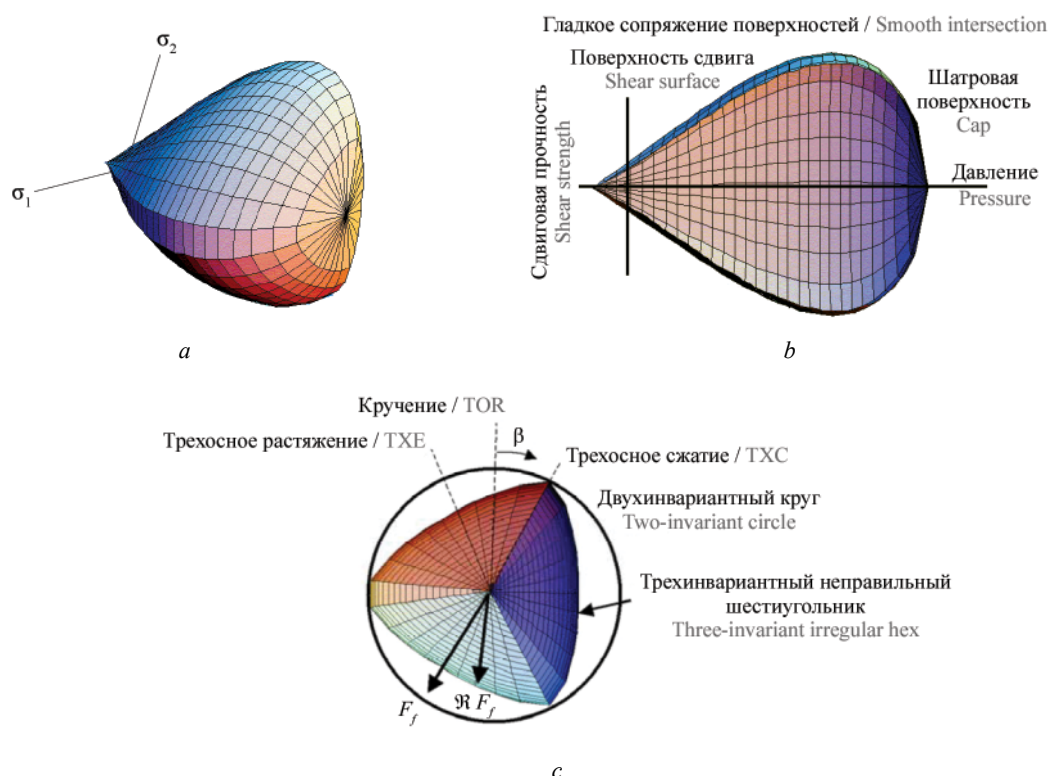


Рис. 4. Модель CSCM⁴: *a* — общая форма поверхности текучести модели бетона в пространстве; *b* — общая форма поверхности текучести модели бетона в меридиональной плоскости; *c* — двух- и трехинвариантные формы модели бетона в девиаторной плоскости

Fig. 4. Model CSCM⁴: *a* — general shape of the concrete model yield surface in three dimensions; *b* — general shape of the concrete model yield surface in two dimensions in the meridional plane; *c* — two- and three invariant shapes of the concrete model in the deviatoric plane

цилиндрическая прочность бетона на сжатие и максимальный размер фракции заполнителя. Такой подход позволяет экономить время при построении модели, однако в отдельных случаях может привести к значительным ошибкам в расчетах [11];

- ручной (*MAT_CSCM) — исходные данные для расчета вычисляются по отдельным методикам, в том числе некоторые из них приняты из CEB-FIP Model Code⁷. Этот подход более трудоемкий, необходимы данные по большому числу характеристик бетона, но он значительно корректнее автоматического способа [11].

В настоящее время в отдельной работе была проведена калибровка и верификация ручной реализации, верификация производилась под бетон европейских марок C20-C60 [11]. По методике [11] можно вычислить все исходные данные для *MAT_CSCM, задавшись при этом всего лишь цилиндрической прочностью бетона на сжатие и максимальным размером фракции заполнителя.

Согласно руководству³, рассматриваемая модель бетона подходит для автоматического способа при цилиндрической прочности бетона на сжатие

в диапазоне 20–58 МПа, с упором на средний диапазон 28–48 МПа. Переводя в кубиковую прочность бетона на сжатие, получаем диапазон 25–67 МПа, при этом средний диапазон соответственно 37–55 МПа.

Параметры бетона для ручного способа из калибровки [11] соответствуют цилиндрической прочности бетона на сжатие в диапазоне 20–60 МПа. Переводя в кубиковую прочность бетона на сжатие, получаем диапазон 25–75 МПа.

Переход от цилиндрической прочности бетона на сжатие (европейские марки бетона C) к кубиковой (современные отечественные классы бетона B) осуществлялся по документу⁸.

В работах [12–15] верифицирована модель CSCM на различных элементах и конструкциях под отечественные классы бетона с неоговоренной реализацией. В свою очередь, в трудах [16, 17] проведена верификация с оговоренной ручной реализацией, в которых принимались характеристики модели по методике [18], где предлагается калибровка параметров бетона под похожую на CSCM численную модель, что не совсем корректно. Спустя вре-

⁷ CEB-FIP Model Code 1990. Design Code. Lausanne : Thomas Telford Services Ltd, 1993. 461 p.

⁸ ГОСТ Р 57345–2016/EN 206-1:2013. Бетон. Общие технические условия. М., 2017.

ма в статье [11] предложена усовершенствованная калибровка CSCM на основании исследования [18] и проведена верификация на нескольких конструкциях, выполненных из европейских марок бетона С.

В настоящем исследовании проводится сопоставительный анализ применения обоих способов реализации CSCM с учетом имеющейся методики калибровки [11] на балках, выполненных из отечественных классов бетона В.

На конечный результат НДС, помимо выбора модели бетона, также существенное влияние оказывает выбор модели арматурной стали. В данной работе сделан акцент на анализ модели бетона, арматурная сталь описывается упругопластической моделью *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY³. Описание и математическое представление данной модели представлено в руководстве^{3, 5}. Уточнение применяемой модели арматурной стали является следующим этапом исследования.

Верификация

Для верификации исследуемых математических моделей выполним сравнение численных и экспериментальных данных. Параметры конструкций, условия и результаты испытаний приняты по материалам [19, 20].

Исходные данные бетонной балки

Испытание бетонной балки осуществлялось согласно данным [19].

Расчетная модель — шарнирно опертая балка, нагруженная двумя сосредоточенными силами (рис. 5, а).

Поперечное сечение балки — квадратное с размерами 100 × 100 мм (рис. 5, б).

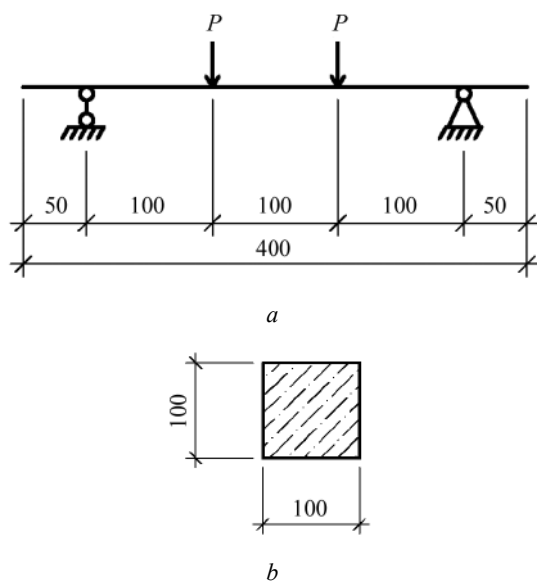


Рис. 5. Расчетная схема бетонной балки: а — расчетная схема; б — поперечное сечение

Fig. 5. Design scheme of a concrete beam: а — design scheme; б — cross-section

Класс бетона по прочности на сжатие — В20. Этот класс бетона не входит в диапазон применимости модели, так как, согласно руководству³ и статье [11], минимальным порогом кубиковой прочности на сжатие для адекватного использования обеих реализаций CSCM является значение 25 МПа. Из представленной выборки конструкций эксперимента была принята балка с маркировкой В0-1.

Исходные данные железобетонной балки

Испытание железобетонной балки осуществлялось согласно данным [20].

Расчетная модель — шарнирно опертая балка, нагруженная двумя сосредоточенными силами (рис. 6, а).

Армирование балки представлено одним плоским каркасом (рис. 6, б). Поперечное сечение балки — прямоугольное с размерами 80 × 120 мм (рис. 6, с).

Класс бетона по прочности на сжатие — В30. Данный класс входит в диапазон применимости обеих реализаций CSCM согласно руководству³ и работе [11]. Из представленной выборки конструкций эксперимента была принята балка с маркировкой БМ1.

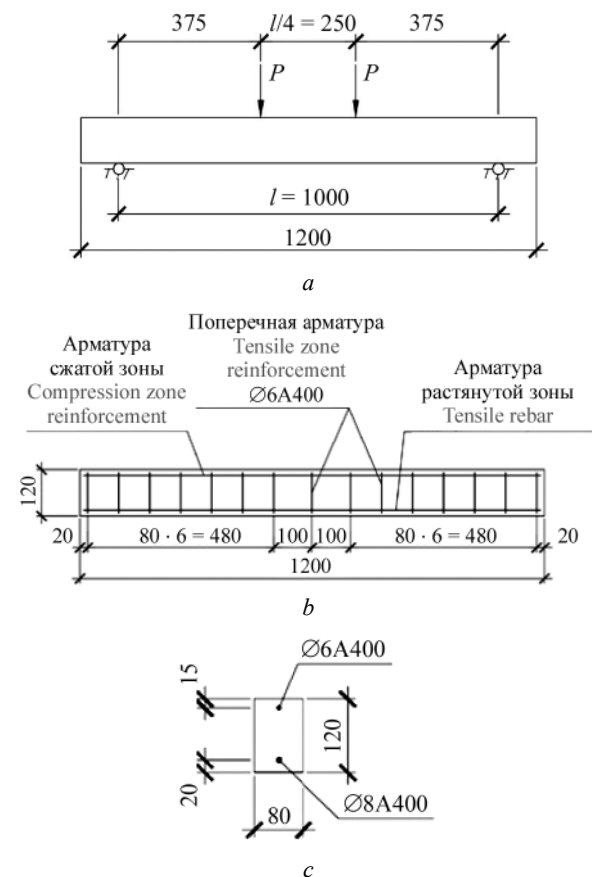


Рис. 6. Расчетная схема железобетонной балки [20]: а — расчетная схема; б — арматурный каркас; с — поперечное сечение (поперечная арматура условно не показана)

Fig. 6. Design scheme of a reinforced concrete beam [20]: а — design scheme; б — reinforcing cage; с — cross-section (transverse reinforcement is conventionally not shown)

Основные сведения из численного моделирования в ПК LS-DYNA

Размер сетки конечных элементов (КЭ) арматуры и бетона принимался равным 10 мм во всех направлениях. Нагрузка прикладывалась в узлы сосредоточенными силами с нарастающей величиной. Бетон моделировался объемными элементами с формулировкой ELFORM = -1. Арматура моделировалась стержневыми элементами с формулировкой ELFORM = 1. Связи задавались в узлах (SPC) модели в соответствии с расчетной схемой — шарнирно опертой балкой. Совместная работа арматурной стали в объемных бетонных элементах описывалась при помощи *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID⁹.

Расчетная КЭ модель бетонной балки показана на рис. 7, железобетонной балки — на рис. 8.

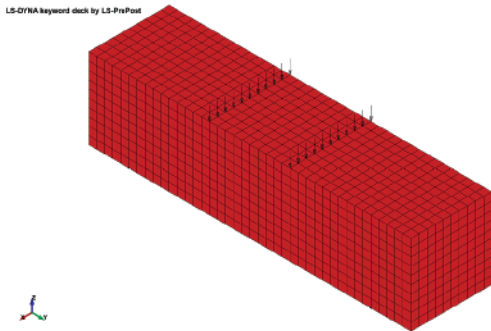


Рис. 7. КЭ модель бетонной балки
Fig. 7. FE model of a concrete beam

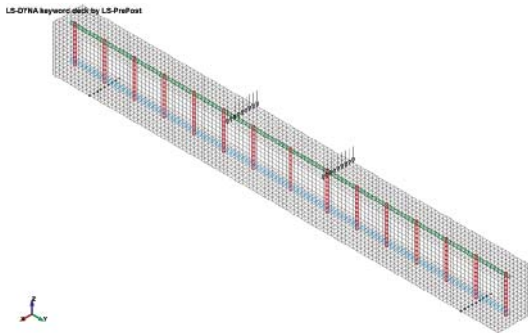


Рис. 8. КЭ модель железобетонной балки
Fig. 8. FE model of a reinforced concrete beam

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бетонная балка

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 1. Графические результаты для анализа представлены на рис. 9–11.

⁹ LS-DYNA. Keyword User’s Manual. Volume I (09/24/21). Livermore : Livermore Software Technology (LST), An Ansys Company, 2021. 3826 p.

Табл. 1. Результаты расчетов бетонной балки
Table 1. Concrete beam analysis results summary

Рассматриваемые случаи Considered cases	Параметры сравнения Comparison parameters		
	Разрушающая нагрузка, кН Breaking load, kN	Прогиб при разрушающей нагрузке, мм Deflection at breaking load, mm	Разница относительно эксперимента по разрушающей нагрузке/по прогибу, % Difference in relation to breaking load/deflection, %
CSCM_CONCRETE (автоматический) (automatic)	6,622	2,105	–19,4/71,14
CSCM (ручной) (manual)	10,010	2,693	21,84/118,94
Эксперимент B0-1 [19] B0-1 experiment [19]	8,216	1,23	–

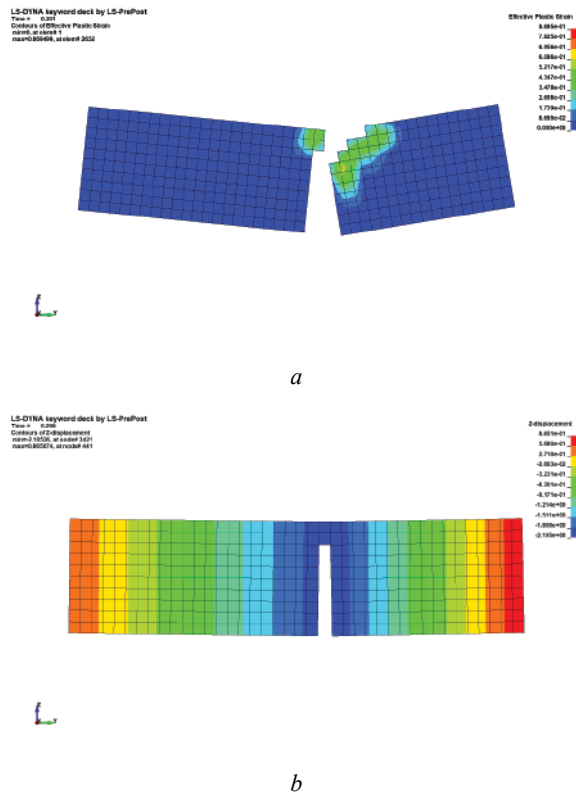


Рис. 9. Результаты для варианта CSCM_CONCRETE:
a — разрушение; b — прогиб при разрушении
Fig. 9. Results for option CSCM_CONCRETE:
a — destruction; b — deflection at destruction

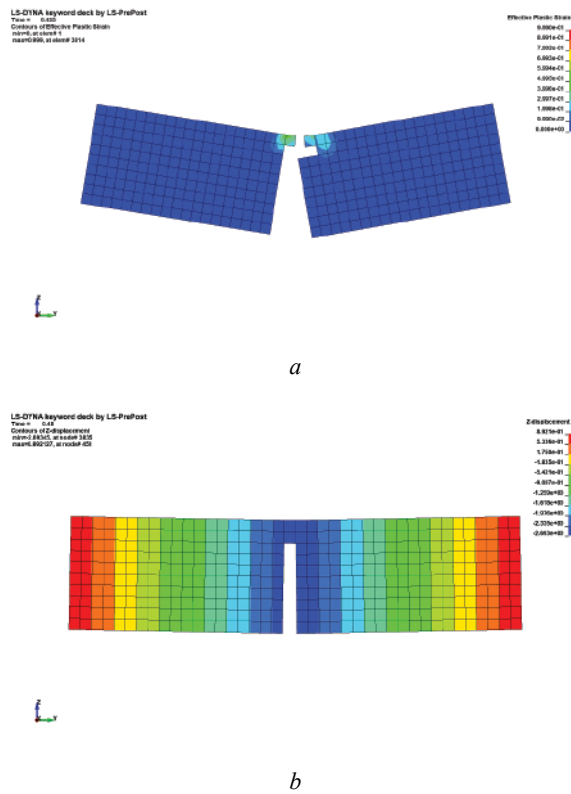


Рис. 10. Результаты для варианта CSCM:
a — разрушение; *b* — прогиб при разрушении
Fig. 10. Results for option CSCM: *a* — destruction;
b — deflection at destruction



Рис. 11. Разрушение из эксперимента [19]
Fig. 11. Destruction from experiment [19]

Железобетонная балка

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 2. Графические результаты для анализа показаны на рис. 12–14.

Табл. 2. Результаты расчетов железобетонной балки

Table 2. Reinforced concrete beam analysis results summary

Рассматриваемые случаи Considered cases	Параметры сравнения Comparison parameters		
	Разрушающая нагрузка, кН Breaking load, kN	Прогиб при разрушающей нагрузке, мм Deflection at breaking load, mm	Разница относительно эксперимента по разрушающей нагрузке по прогибу, % Difference in relation to breaking load/deflection, %
CSCM_CONCRETE (автоматический) (automatic)	13,77	11,92	–16,95/–14,55
CSCM (ручной) (manual)	13,842	10,93	–16,51/–21,65
Эксперимент BM1 [20] BM1 experiment [20]	16,58	13,95	—

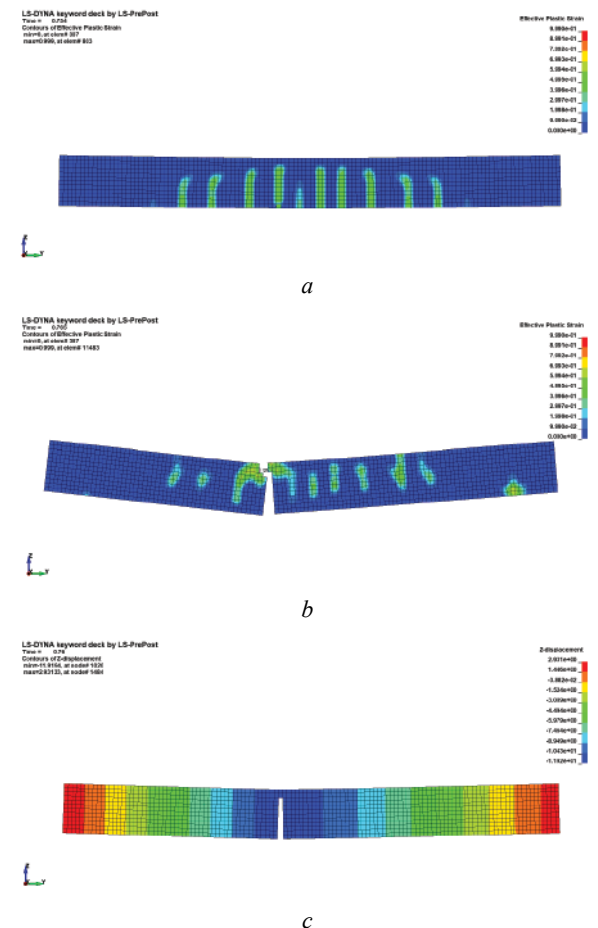


Рис. 12. Результаты для варианта CSCM_CONCRETE:
a — концентраторы повреждений; *b* — разрушение;
c — прогиб при разрушении

Fig. 12. Results for option CSCM_CONCRETE:
a — damage concentrators; *b* — destruction;
c — deflection at destruction

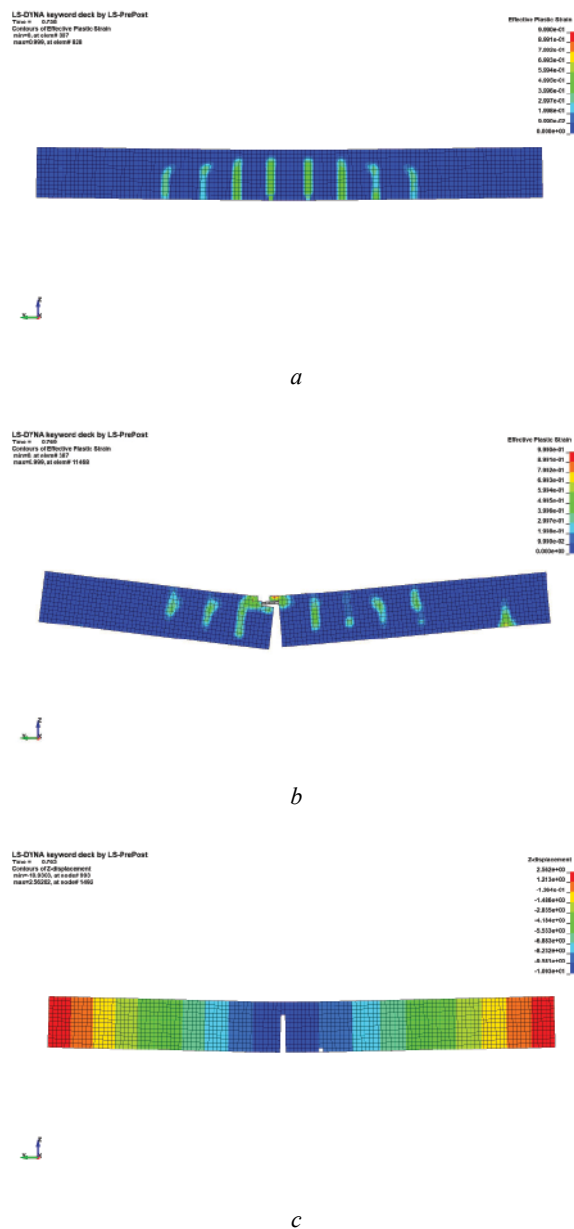


Рис. 13. Результаты для варианта CSCM:
 а — концентраторы повреждений; б — разрушение;
 с — прогиб при разрушении

Fig. 13. Results for option CSCM:
 а — damage concentrators; б — destruction;
 с — deflection at destruction

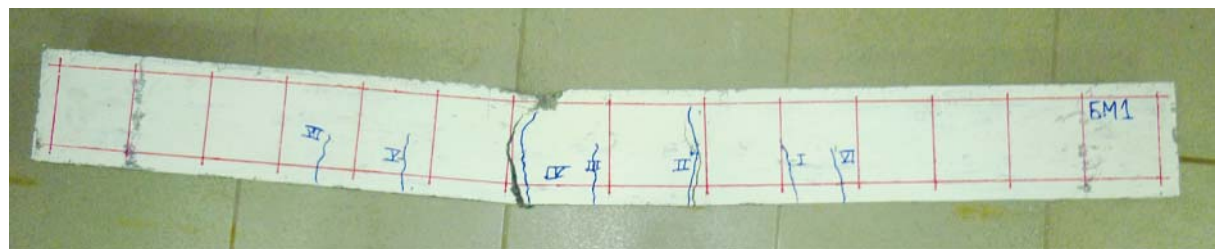


Рис. 14. Разрушение из эксперимента [20]

Fig. 14. Destruction from experiment [20]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ по бетонной балке. Для обоих способов применения модели CSCM разница с экспериментом по разрушающей нагрузке составляет 20 %, при этом автоматический вариант занижает разрушающую нагрузку, а ручной завышает ее. Касательно прогибов, для ручного варианта разница с экспериментом достигает до 120 %, в то время как для автоматического разница составляет около 70 %, в обоих случаях прогиб завышен, но здесь стоит учитывать малую величину прогибов — мм. Разрушение для автоматического варианта произошло не по центру конструкции (рис. 9, а), в то время как для ручного — ровно по центру (рис. 10, а), как и в эксперименте (рис. 11). Напомним, что для обоих вариантов реализаций класс бетона В20 не входит в область адекватного применения модели, согласно сведениям³ и работе [11]. Таким образом, в одном случае картина деформирования отличается от фактической (автоматический), а для другого случая разрушающая нагрузка сильно завышена (ручной).

Для бетонных конструкций из класса бетона В20 применение этой модели не рекомендуется. Для железобетонных конструкций из класса бетона В20 ее применение должно быть обосновано сравнением с экспериментальными данными.

Анализ по железобетонной балке. Для обоих способов применения модели CSCM разница с экспериментом по разрушающей нагрузке составляет до 17 %, оба варианта занижают разрушающую нагрузку. Касательно прогибов, для ручного варианта разница составляет около 20 %, для автоматического — до 15 %, в обоих случаях прогиб занижен. Картина разрушения для обоих вариантов очень похожа — разрушение произошло чуть левее центра (рис. 12, б; 13, б) по одному из концентраторов повреждений (рис. 12, а; 13, а). Картина разрушения для ручного варианта (рис. 13, б) больше похожа на экспериментальные данные (рис. 14).

Хочется отдельно остановиться на концентраторах повреждений, для автоматического варианта (рис. 12, а) можно увидеть 10 ярко выраженных и 2 слабо выраженных концентраторов, а для ручного (рис. 13, а) — 8 концентраторов, можно пред-

положить, что по областям этих концентраторов в эксперименте и были выявлены трещины в бетоне в количестве 7 шт. (рис. 14), т.е. ручной вариант показывает более достоверную и надежную картину. Трещины в процессе численного расчета не были отслежены, поскольку модель CSCM не позволяет это сделать, для отслеживания процесса трещинообразования нужно использовать другие модели.

Для железобетонных балок, выполненных из бетона класса В30, можно рекомендовать к использованию оба варианта, однако ручной вариант более точен.

Расхождение в результатах можно объяснить отличием фактических прочностных характеристик испытываемых конструкций и исходными данными в расчетных моделях. С целью уточнения результатов численных исследований планируется использовать теорию надежности.

Для дальнейших исследований предполагается применять ручной вариант (*MAT_CSCM) модели CSCM с характеристиками под класс бетона В30 (по методике [11]) при моделировании сложных конструкций и решении нелинейных задач, таких как расчет на прогрессирующее обрушение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев М.И. Верификация расчетных моделей железобетонных зданий, проектируемых для сейсмических районов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 157 с.
2. Булушев С.В. Оценка сейсмостойкости зданий с рамным каркасом на основе вероятностного нелинейного динамического анализа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 154 с.
3. Mkrtychev O.V. Study of the composite action of concrete and reinforcement in the floor in case of emergency impact // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1425. Issue 1. P. 012147. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012147
4. Мкртычев О.В., Дударева М.С. Учет совместной работы железобетонного здания с грунтом основания при интенсивном сейсмическом воздействии // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 2 (28). С. 3. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.3
5. Мкртычев О.В., Булушев С.В. Оценка коэффициента учета допускаемых повреждений для железобетонного пространственного здания при землетрясении // Проблемы научно-практической деятельности. Перспективы внедрения инновационных решений. 2019. С. 64–69.
6. Мкртычев О.В., Андреев М.И. Оценка значения коэффициента допускаемых повреждений для рамно-связевого железобетонного каркаса при землетрясении // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 34–40. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.34-40
7. Andreev M., Sidorov D. Verification analysis of the degradation of frequency parameters under the action of seismic load // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012010
8. Mkrtychev O. Degradation of dynamic parameters of reinforced concrete buildings during an earthquake // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012013
9. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Calculation of reinforced concrete structures with a set seismic stability level on an earthquake // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 475–482. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.161
10. Hou J., Song L. Progressive collapse resistance of RC frames under a side column removal scenario: The mechanism explained // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2016. Vol. 10. Issue 2. Pp. 237–247. DOI: 10.1007/s40069-016-0134-y
11. Dmitriev A.N., Novozhilov Y.V., Mikhailuk D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 636. DOI: 10.3390/buildings12050636
12. Мкртычев О.В., Андреев М.И. Численные исследования прочности бетонных цилиндров на сжатие // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 433–437. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437
13. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123
14. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Verification of the reinforced concrete beam model based on the results of a full-scale experimental study // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 01029. DOI: 10.1051/mateconf/201819601029
15. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M.S. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 04013. DOI: 10.1051/mateconf/201825104013
16. Герцук С.М., Новожилов Ю.В., Мухлюк Д.С. Численное моделирование динамики и прочности железобетонной плиты под воздействием воздушной ударной волны // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 3. С. 298–310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24

17. Dmitriev A.N., Lalin V.V. Comparison of different procedures for progressive collapse analysis of RC flat slab structures under corner column loss scenario // *Buildings*. 2021. Vol. 11. Issue 9. P. 405. DOI: 10.3390/buildings11090405

18. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol. 97. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002

19. Кашеев Г.Г., Щеткова Е.А. Экспериментальное исследование изгиба балок из фибробетона, армированного хризотилом // *Вестник ПТО РААСН*. 2017. № 20. С. 200–206.

20. Фролов Н.В., Полоз М.А., Колесникова Е.Г. Экспериментальные исследования образцов армобетонных балок с двухрядным расположением в растянутой зоне стержней стальной и стеклопластиковой арматуры // *Вестник БГТУ*. 2016. № 10. С. 83–88. DOI: 10.12737/22060

Поступила в редакцию 21 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 10 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Азиз Рамизович Сафаров — аспирант кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 989951; emailuser@internet.ru;

Владимир Богданович Дорожинский — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 869798, Scopus: 57195235498, ORCID: 0000-0001-9830-2389; dorozhinski@mail.ru;

Владимир Игоревич Андреев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655615, Scopus: 57198780961, ResearcherID: T-9006-2017, ORCID: 0000-0002-1057-4329; asv@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Сафаров А.Р. — идея, сбор данных, обработка данных, написание статьи.

Дорожинский В.Б. — научное руководство, научное редактирование текста.

Андреев В.И. — научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Andreev M.I. *Verification of design models of reinforced concrete buildings designed for seismic regions : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2021; 157. (rus.).
2. Bulushev S.V. *Estimation of seismic resistance of buildings with a frame carcass based on a probabilistic nonlinear dynamic analysis : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2020; 154. (rus.).
3. Mkrtichev O.V. Study of the composite action of concrete and reinforcement in the floor in case of emergency impact. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012147. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012147
4. Mkrtichev O.V., Dudareva M.S. Accounting the combined action of the reinforced concrete building with foundation soil in case of strong ground shaking. *Construction: Science and Education*. 2018; 8(2):3. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.3 (rus.).
5. Mkrtichev O.V., Bulushev S.V. Estimation of the coefficient of allowable damage for a reinforced concrete spatial building during an earthquake. *Problems of Scientific and Practical Activity. Prospects for the Implementation of Innovative Solutions*. 2019; 64–69. (rus.).
6. Mkrtichev O.V., Andreev M.I. Estimation of the value of the coefficient of permissible damages for a frame-bonded reinforced concrete frame under earthquake. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:34–40. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.34–40 (rus.).
7. Andreev M., Sidorov D. Verification analysis of the degradation of frequency parameters under the action of seismic load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012010. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012010
8. Mkrtichev O. Degradation of dynamic parameters of reinforced concrete buildings during an earthquake. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012013. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012013
9. Mkrtichev O.V., Busalova M.S. Calculation of reinforced concrete structures with a set seismic stability level on an earthquake. *Procedia Engineering*. 2016; 153:475–482. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.161

10. Hou J., Song L. Progressive collapse resistance of RC frames under a side column removal scenario: The mechanism explained. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016; 10(2):237–247. DOI: 10.1007/s40069-016-0134-y
11. Dmitriev A.N., Novozhilov Y.V., Mikhailuk D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation. *Buildings*. 2022; 12(5):636. DOI: 10.3390/buildings12050636
12. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Numerical studies of strength of concrete cylinders for compression. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019; 15(6):433–437. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437 (rus.).
13. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00123. DOI: 10.1051/matec-conf/201711700123
14. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Verification of the reinforced concrete beam model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:01029. DOI: 10.1051/matec-conf/201819601029
15. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M.S. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04013. DOI: 10.1051/matec-conf/201825104013
16. Gertsik S.M., Novozhilov Y.V., Mikhailuk D.S. Numerical simulation of the dynamics of a reinforced concrete slab under an air shock wave. *Computational Continuum Mechanics*. 2020; 13(3):298–310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24 (rus.).
17. Dmitriev A.N., Lalin V.V. Comparison of different procedures for progressive collapse analysis of RC flat slab structures under corner column loss scenario. *Buildings*. 2021; 11(9):405. DOI: 10.3390/buildings11090405
18. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 97:1–19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002
19. Kashevarova G.G., Shchetkova E.A. Experimental study of the bending of beams made of fiber-reinforced concrete reinforced with chrysotile. *Vestnik of the Volga Territorial Branch RAASN*. 2017; 20:200–206. (rus.).
20. Frolov N.V., Poloz M.A., Kolesnikova E.G. Experimental studies of samples of reinforced concrete beams with a two-row arrangement in the tension zone of steel and fiberglass reinforcement bars. *Vestnik BGTU*. 2016; 10:83–88. DOI: 10.12737/22060. (rus.).

Received December 21, 2022.

Adopted in revised form on February 10, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Aziz R. Safarov** — postgraduate student of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 989951; emailuser@internet.ru;

Vladimir B. Dorozhinskij — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 869798, Scopus: 57195235498, ORCID: 0000-0001-9830-2389; dorozhinski@mail.ru;

Vladimir I. Andreev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655615, Scopus: 57198780961, ResearcherID: T-9006-2017, ORCID: 0000-0002-1057-4329; asv@mg-su.ru.

Contribution of the authors:

Aziz R. Safarov — idea, data gathering, data processing, writing of the article.

Vladimir B. Dorozhinskij — scientific guidance, scientific editing of the text.

Vladimir I. Andreev — scientific editing of the text.

The authors declare no conflicts of interest.

Анализ напряженно-деформированного состояния пролетной трехгранной фермы при линейных нагрузках

Евгений Анатольевич Мелёхин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются конструкции трехгранных ферм для покрытий и перекрытий производственных и общественных зданий, различных комбинированных систем, а также в качестве конструкций эстакад линейных объектов в разных районах строительства. Представлена запатентованная разработка конструкции пространственной трехгранной фермы с неразрезными поясами замкнутого составного сечения из прокатных профилей с бесфасоночными узлами сопряжения. Пятигранное составное сечение поясных стержней комплектуется из прокатных элементов швеллера и уголка. Цель численных исследований — оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетной трехгранной фермы с размещением покрытия из профилированного настила непосредственно по ее верхним неразрезным поясам, систематизация полученной информации для обоснования элементного состава конструкций, а также формирование верификационной базы численных экспериментов для дальнейшего развития комплексных научных исследований.

Материалы и методы. В основе численных исследований используется пространственно-стержневая модель пролетной трехгранной фермы. Принятой методикой учитывается приложение линейных статических нагрузок с нулевой изменчивостью значений, которое моделирует размещение ограждающей конструкции покрытия из профнастила по верхним поясам. Адаптация метода единичных нагрузок ориентирована на оценку реакции стержневой системы для анализа и сопоставления данных с результатами последующих задач в рамках комплексных научных исследований.

Результаты. Получены результаты, характеризующие НДС модели трехгранной фермы в виде распределения усилий в стержнях и вертикальных перемещений узлов. Проведен их анализ, установлены зависимости и выявлены закономерности.

Выводы. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная модель трехгранной фермы адекватно отражает ее НДС. Практическое применение результатов численных исследований состоит в возможности их использования для обоснования элементного состава при проектировании конструкции трехгранной фермы. Полученные результаты включены в базу верификационных данных для последующих численных исследований изучения действительной работы пролетных трехгранных ферм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трехгранная ферма, численные исследования, метод конечных элементов, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, бесфасоночный узел

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мелёхин Е.А. Анализ напряженно-деформированного состояния пролетной трехгранной фермы при линейных нагрузках // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 556–571. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.556-571

Автор, ответственный за переписку: Евгений Анатольевич Мелёхин, melean@mail.ru.

Analysis of the stress-strain state of the spanning trihedral truss under linear loads

Evgeniy A. Melyokhin

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

ABSTRACT

Introduction. The structures of trihedral trusses for roofs and overlaps of industrial and public buildings, various combined systems and as trestle structures of linear objects in different building regions are considered. The work presents a patented design of the spatial three-sided truss with the continuous chords of the closed compound cross-section made of rolled sections with the seamless joints. The pentagonal composite cross-section of the girders is composed of rolled channels and angles. The purpose of numerical studied is the estimation of the stress-strain state (SSS) of a span trihedral truss with placement of a profiled deck covering directly along its upper continuous chords, systematization of the received information for substantiation of element composition of structures as well as the formation of a verification base of numerical experiments for further development of complex scientific studies.

Materials and methods. Numerical research is based on a special-rod model of a spanning trihedral truss. The adopted method takes into account the application of linear static loads with zero variability of values, which simulates the location

of the enclosing structure of the corrugated sheeting along the upper chords. The adaptation of the single loads method is oriented to the evaluation of the reaction of the rod system in order to analyze and compare data with the results of the following tasks within the framework of the complex research.

Results. The results characterizing the deflected mode of the trihedral truss model as a distribution of efforts in the rods and vertical displacements of the joints have been obtained. They have been analyzed, their dependencies have been found and the regularities have been revealed.

Conclusions. The analysis of the obtained results shows that the accepted computational model of a trihedral truss adequately reflects its SSS. Practical application of numerical results consists in the possibility of their use for substantiation of element structure at designing a construction of a three-sided truss. The results obtained are included in the verification data base for further numerical studies of actual operation of span trihedral trusses.

KEYWORDS: trihedral truss, numerical studies, finite element method, calculation model, stressed-strained state, bezel-less assembly

FOR CITATION: Melyokhin E.A. Analysis of the stress-strain state of the spanning trihedral truss under linear loads. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023. 18(4):556-571. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.556-571

Corresponding author: Evgeniy A. Melyokhin, melean@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие комплексных научных исследований направлено на расширение применения трехгранных ферм в создании простых и сложных архитектурных форм зданий и сооружений [1–3]. Простыми архитектурными формами эффективного использования трехгранных ферм являются плоскостные покрытия производственных и общественных зданий для различных климатических районов строительства [4–6].

Пространственные трехгранные фермы относятся к несущим конструкциям с высокими эксплуатационными характеристиками и широким диапазоном применения за счет возможности рационального распределения материала в пространстве строительного объема конструктивной формы [7–9]. Конструктивная форма с использованием трехгранных ферм обладает возможностями по структурной трансформации формы и габаритных размеров [10].

Показатели стоимости изготовления и возведения строительных конструкций зависят от многих факторов [11, 12]. Объективная оценка экономической эффективности применения трехгранных ферм должна учитывать влияние особенностей конструктивной компоновки, статической работы, распределения нагрузок в составе несущей системы покрытия [13, 14]. Следует отметить, что структура формообразования трехгранной фермы имеет высокий потенциал типизации и унификации, в том числе за счет применения стержней из прокатных профилей [15]. Применение конструкций трехгранных ферм со стержнями составного сечения из прокатных профилей, а также формирование бесфасоночных узлов сопряжения элементов повышает эффективность их применения [16].

Пятигранное составное сечение поясных стержней комплектуется из прокатных элементов швеллера и уголка [17]. В результате сопряжения полок по длине прокатных элементов швеллера и уголка посредством полнотелых или прерывистых

(шпоночных) сварных швов формируется стержень пятигранного составного сечения монолитной компоновки (рис. 1).

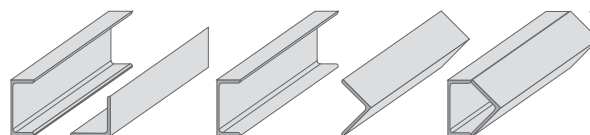


Рис. 1. Схема компоновки пятигранного составного сечения из прокатных профилей

Fig. 1. Layout diagram of a pentahedral composite section of rolling profiles

Соответственно, три наружных грани составного пятигранного сечения при взаимной ортогональной ориентации определяются формой швеллера, его стенкой и полками, а две другие наружные грани также с взаимной ортогональной ориентацией — полками прокатного равнополочного уголка (рис. 2). Каждая грань стержня составного профиля потенциально представляет собой направление для развития конструктивной формы пространственно-стержневой системы с бесфасоночными узлами сопряжения элементов [18].

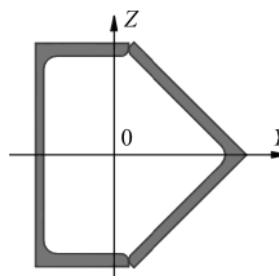


Рис. 2. Пятигранное составное сечение из профилей швеллера и уголка

Fig. 2. Pentahedral composite section of channel and corner profiles

Составное сечение из прокатных профилей имеет показатели геометрических характеристик, сопоставимых с другими трубчатыми сечениями равноустойчивых стержней. Пример компоновки пятигранного составного профиля из швеллера 16П (ГОСТ 8240–89) с параллельными гранями полок и равнополочного уголка 110 × 7 (ГОСТ 8509–93) наглядно демонстрирует результат компоновочных преобразований (табл.).

Представленный пятигранный профиль выбран из условия применения минимальных толщин пластин проката и имеет соотношение минимальных радиусов инерции 0,847, что достаточно близко по этому значению к сечениям равноустойчивых стержней квадратных и круглых труб, а также некоторых прямоугольных труб с соотношением граней ширины и высоты как 3/4. Если значения геометрических характеристик сечений прокатов швеллера и уголка относительно горизонтальной оси сопоставимы с результатом их компоновки, то при изме-

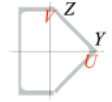
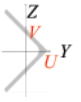
нении пространственной ориентации сечения при его повороте на 90° значения этих характеристик отличаются значительной кратностью или даже на порядок. Значение момента инерции относительно горизонтальной оси превышает в 1,39 раза значение момента инерции относительно вертикальной оси пятигранного сечения.

В запатентованной разработке покрытия из трехгранных ферм в качестве неразрезных поясов используются стержни пятигранного составного сечения [19]. Изобретение состоит в том, что покрытие формируется из трехгранных ферм, объединенных профнастилом, который является несущей конструкцией ограждающего покрытия (рис. 3).

Каждая ферма состоит из двух наклонных спаренных по общему нижнему поясу плоских ферм. В качестве поясов используются стержни составного пятигранного профиля. Раскосная решетка из одиночных уголков прикреплена к полкам поясных уголков встык (рис. 4).

Основные геометрические характеристики сечений из стальных прокатных профилей

The main geometric characteristics of sections of steel profiles

Параметр Parameter			
Состав сечения Section composition	П16-110-7 (16П, L110 × 7)	16П	L110 × 7
Габариты (В × Н), мм / Dimensions (W × H), mm	146 × 160	64 × 160	79,9 × 155,6
Площадь поперечного сечения A , см ² Cross-sectional area A , cm ²	33,25	18,1	15,15
Момент инерции относительно горизонтальной оси $Y (I_y)$, см ⁴ Moment of inertia about the horizontal axis $Y (I_y)$, cm ⁴	1025,941	750	275,941
Момент инерции относительно вертикальной оси $Z (I_z)$, см ⁴ Moment of inertia about the vertical axis $Z (I_z)$, cm ⁴	736,7	72,8	75,007
Момент инерции при кручении (I_t) , см ⁴ Moment of inertia about the torsion (I_t) , cm ⁴	5,533	3,196	2,338
Радиус инерции от оси $Y (i_y)$, см Radius of inertia about the Y axis (i_y) , cm	5,555	6,437	4,268
Радиус инерции от оси $Z (i_z)$, см Radius of inertia about the Z axis (i_z) , cm	4,707	2,006	2,225
Максимальный момент сопротивления, от оси $Y (W_{y+})$, см ³ Maximum moment of resistance, Y axis (W_{y+}) , cm ³	128,243	93,75	35,476
Минимальный момент сопротивления, от оси $Y (W_{y-})$, см ³ Minimum moment of resistance, Y axis (W_{y-}) , cm ³	128,243	93,75	35,476
Максимальный момент сопротивления, от оси $Z (W_{z+})$, см ³ Maximum moment of resistance, Z axis (W_{z+}) , cm ³	83,909	16,433	17,945
Минимальный момент сопротивления, от оси $Z (W_{z-})$, см ³ Minimum moment of resistance, Z axis (W_{z-}) , cm ³	126,575	36,954	19,684
Пластический момент сопротивления, от оси $Y (W_{pl,y})$, см ³ Plastic moment of resistance, Y axis $(W_{pl,y})$, cm ³	164,566	109,18	55,52
Пластический момент сопротивления, от оси $Z (W_{pl,z})$, см ³ Plastic moment of resistance, Z axis $(W_{pl,z})$, cm ³	139,801	32,97	28,94

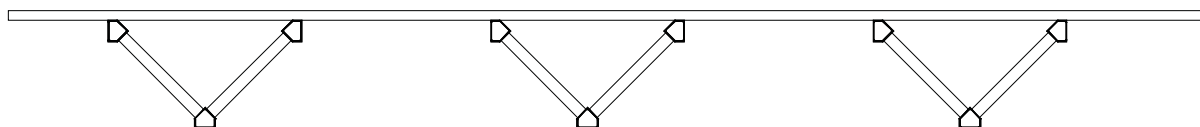


Рис. 3. Покрытие из трехгранных ферм (продольный разрез)

Fig. 3. Trihedral trusses of planar roofs (longitudinal section)

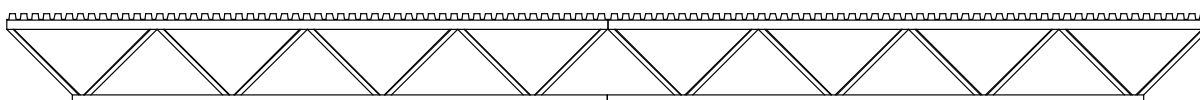


Рис. 4. Плоские наклонные фермы с параллельными поясами

Fig. 4. Flat inclined trusses with parallel chord

Компоновка стыковых бесфасоночных узлов связана с размещением штампов раскосных уголков на полках поясных уголков пятигранного составного стержня. Формирование штампа осуществляется подрезкой полки прокатного уголка, из которого выполнен раскос.

Пространственная ориентация сечений неразрезных поясных стержней произведена с учетом особенностей геометрических характеристик составного сечения. Ориентация сечений верхних поясов принята из условия размещения в плоскости наибольшей изгибной жесткости составных стержней по направлению воздействия равномерных линейных нагрузок, приходящихся от размещенного по верхним поясам покрытия из профилированного настила.

Разработанное покрытие из трехгранных ферм позволяет использовать ограждающую конструкцию с прогонной системой при ограниченной несущей способности профнастила, а также при необходимости увеличения шага установки трехгранных ферм. В этом случае необходимо учитывать, что размещение прогонов по узлам верхних поясов сопровождается включением их в статическую работу конструкции трехгранной фермы (рис. 5).

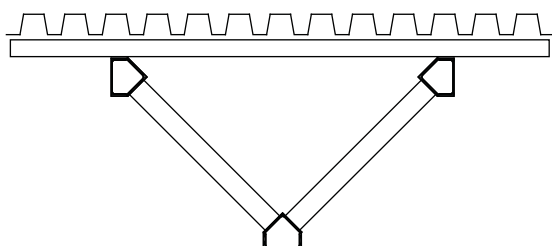


Рис. 5. Фрагмент покрытия из трехгранных ферм с прогонами ограждающей конструкции

Fig. 5. Fragment trihedral trusses of planar roofs with girders of the enclosing structure

При недостаточной несущей способности покрытия из профилированного настила также рационально использовать затяжки, которые устанавливаются в узлах верхних поясов. Затяжки могут входить в состав отправочных марок модульных трехгранных ферм, которые устанавливаются по крайним узлам их верхних поясов (рис. 6).

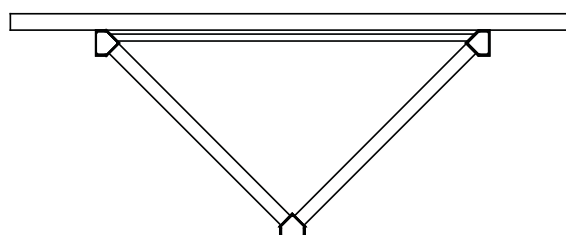


Рис. 6. Фрагмент покрытия из трехгранных ферм с профнастилом ограждающей конструкции

Fig. 6. Fragment trihedral trusses of planar roofs with profiles sheeting of the enclosing structure

Возможность использования затяжек, несущих элементов ограждающих конструкций в виде прогонов и профилированного настила для формирования конструктивной жесткости пространственной трехгранной фермы обусловлена особенностями ее статической работы в составе несущей системы покрытия [20].

Исключение из состава трехгранной фермы элементов конструктивной жесткости, расположенных в горизонтальной плоскости, направлено на повышение эффективности применения конструкций, в том числе возможность применения компактного и безопасного комплектования для складирования и транспортирования ее отправочных марок (рис. 7).

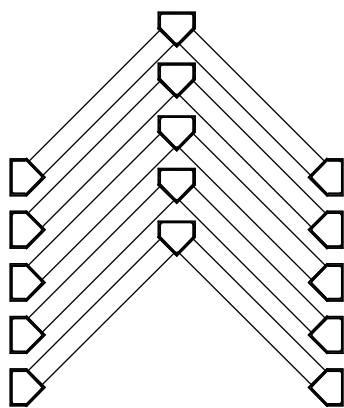


Рис. 7. Компоновка отправочных марок трехгранных ферм

Fig. 7. Layout of transport modules of trihedral trusses

Конструктивная форма покрытия из трехгранных ферм образуется их последовательной установкой в направлении формирования длины покрытия (рис. 8). В зависимости от нагрузки структура плоского покрытия может формироваться размещением конструкций трехгранных ферм с переменным или одинаковым шагом.

Профнастил ограждающей конструкции покрытия размещается непосредственно по верхним

неразрезным поясам трехгранных ферм. Крепление производится в каждом гофре.

Цель численных исследований — оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетной трехгранной фермы с размещением покрытия из профилированного настила непосредственно по ее верхним неразрезным поясам, систематизация полученной информации для обоснования элементного состава конструкций, а также формирование верификационной базы численных экспериментов для дальнейшего развития комплексных научных исследований.

В качестве задач численных исследований рассматривалось создание расчетной математической модели пролетной трехгранной фермы средствами стандартного расчетного комплекса на основе реализации метода конечных элементов (МКЭ). При этом расчетная модель должна учитывать создание вариативных моделей для возможности сопоставления с результатами, полученными в рамках постановки иных условий исследовательских задач.

Формирование пространственно-стержневой расчетной модели производилось на основе централизованной геометрической схемы. Компоновочные особенности данной схемы связаны с тем, что расположение элементов стержневой структуры может быть представлено гранями объемных многогранников в пределах смежных узлов, которые являются центрами их сопряжения (рис. 9).

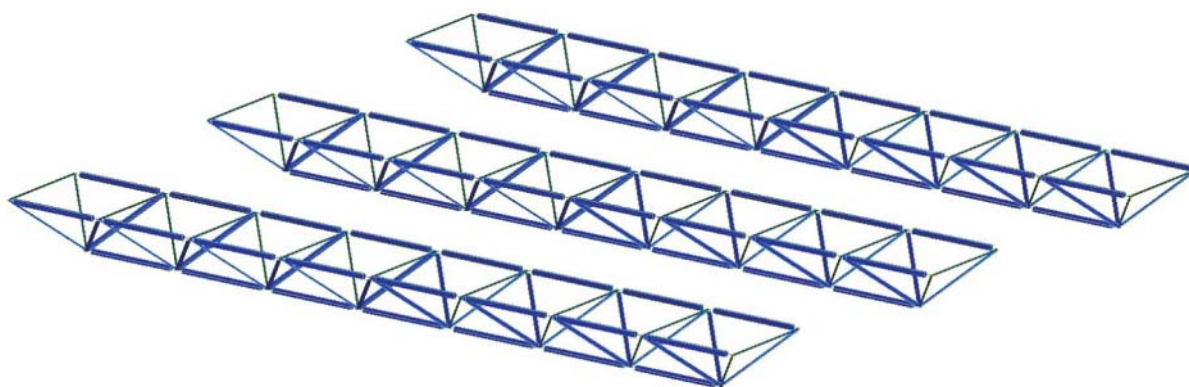


Рис. 8. Трехгранные фермы плоскостного покрытия

Fig. 8. Trihedral trusses of planar roofs

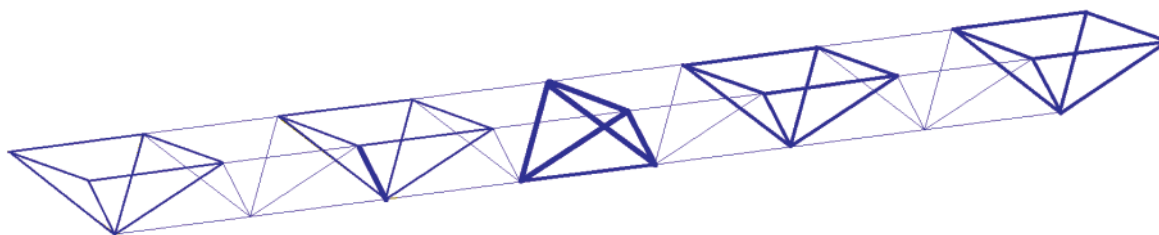


Рис. 9. Компоновочная структура стержневой системы трехгранной фермы

Fig. 9. Layout structure of trihedral trusses

Возможность возведения зданий с использованием покрытий из трехгранных ферм в различных районах строительства предполагает необходимость учитывать изменчивость влияющих параметров воздействий. Изменчивость значений нормативных и расчетных нагрузок обусловлена не только особенностями определения суммарного влияния постоянных и временных нагрузок согласно современным нормам проектирования [21, 22]. В зависимости от предъявляемых требований по микроклимату к внутренним помещениям здания возможны варианты состава ограждающей конструкции покрытия для обеспечения его энергетической эффективности, что влечет изменения в значениях постоянных нагрузок [23–26].

В зависимости от географического местоположения района строительства определяются значения снеговых нагрузок. Возможности увеличения шага размещения трехгранных ферм в пределах несущей способности профлиста также предполагает изменчивость значений нагрузок.

Получение структурированных данных, обусловленных изменчивостью нагрузок, имеет практическое значение для проектирования типовых трехгранных ферм для обоснования рациональной выборки элементного состава. В свою очередь, получение данных по выборке элементного состава направлено на разработку типовых конструкций бесфасоночных узлов сопряжения, позволяющих обобщить их и исключить вариации с близкими параметрами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе оценки НДС использовалась расчетная математическая модель трехгранной фермы, сгенерированная средствами программного комплекса, реализующего расчетные задачи по МКЭ [27]. Стержневая пространственная ферма описывалась элементами произвольного вида со связями по линейным и угловым направлениям [28, 29]. В качестве неразрезных поясов использовались стержни пятигранного составного сечения с ориентацией пространственного положения, принятой в запатентованном конструктивном решении.

Раскосы из одиночных прокатных уголков являются элементами малой изгибной жесткости. Поэтому для оценки их влияния на деформативные свойства модели трехгранной фермы рассматривались варианты с жестким или шарнирным примыканием элементов раскосной решетки к неразрезным поясам.

Также в расчетной схеме предусматривалась установка затяжек во всех узлах верхних поясов с шарнирным примыканием.

Граничные условия расчетной схемы пролетной фермы учитывали закрепления с линейными ограничениями по опорным узлам верхних поясов во всех направлениях, кроме освобождения смежной опорной пары узлов в продольном направлении модели [30].

Для получения данных численных исследований рассматривалась вариативная расчетная модель, которая моделирует пространственно-стержневую трехгранную ферму пролетом 24 м, шириной 3 м и высотой 1,5 м (рис. 10). Модульные размеры панелей нижнего и верхних поясов составляют 3 м. Таким образом, стержневая модель включает восемь панелей по верхним поясам и семь панелей по нижнему поясу, каждая панель по 3 м.

Методикой численных исследований учитывается приложение линейных нагрузок по верхним поясам фермы, моделирующее размещение ограждающей конструкции покрытия с применением профнастила. Распределенная линейная нагрузка в пределах длины панелей верхних поясов описывается зависимостью:

$$s = (kx + b), \text{ кН/м},$$

где k — коэффициент изменчивости формы приложения нагрузки в виде соотношения значения переменной части нагрузки в панели к длине этой панели, (кН/м)/м; x — переменная координата в пределах длины верхних поясов фермы; b — значение постоянной части линейной нагрузки в пределах ширины грузовой площади, кН/м.

Соответственно, равномерно распределенная линейная нагрузка с нулевым значением изменчивости в пределах длины верхних поясов примет вид:

$$s = b, \text{ кН/м}.$$

где b — значение линейной нагрузки в пределах ширины грузовой площади панелей верхнего пояса.



Рис. 10. Расчетная модель трехгранной фермы

Fig. 10. Calculation model of trihedral trusses

При этом постоянная линейная нагрузка в пределах ширины грузовой площади b является ее суммарным значением.

В рамках представленных исследований рассматривались два варианта приложения нагрузок в виде равномерно распределенной линейной нагрузки.

Первый вариант приложения по методу единичных нагрузок направлен на определение реакции несущей системы в виде распределения усилий в элементах и перемещений узлов при упругой работе материала конструкции (рис. 11).

Распределенная единичная линейная нагрузка с нулевым значением изменчивости в пределах всей длины верхних поясов примет вид:

$$s = b = 1, \text{ кН/м.}$$

Второй вариант учитывает необходимость сопоставления полученных данных с другими исследовательскими задачами, в частности, при использовании единичной узловой нагрузки. Поэтому суммарное значение линейной распределенной нагрузки в пределах панелей верхних поясов должно соответствовать суммарному значению сосредоточенной нагрузки в узлах верхних поясов (рис. 12).

Равномерно распределенная приведенная линейная нагрузка с нулевым значением изменчивости в пределах длины верхних поясов примет вид:

$$s = z/c = 1/3, \text{ кН/м,}$$

где z — единичная узловая нагрузка в пределах панели; c — сумма длин смежных полупанелей, принадлежащих узлу ($c/2 + c/2$), 3 м.

Применение метода единичных нагрузок направлено на определение реакции стержневой системы и обусловлено необходимостью проведения сравнительной оценки, сопоставления с полученными данными других исследовательских задач, а также возможностью практического применения при рас-

четах по методу предельных состояний для различных условий вариативности значений нагрузок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения численных исследований получены данные, характеризующие НДС модели трехгранной фермы. Определены расчетные усилия от действия нагрузок и значения перемещений узлов вариативной стержневой модели трехгранной фермы с шарнирным и жестким примыканием раскосов к неразрезным поясам. Разность значений внутренних усилий в неразрезных поясах не превышает 1 %.

Распределение усилий в элементах вариативных расчетных моделей имеет характерные зависимости, которые отличаются практически полной симметрией относительно середины пролета. Результаты расчетов представлены ниже в виде распределения значений по узлам и элементам стержневой вариативной модели в изометрии, в плане или виде сбоку.

Наиболее нагруженными стержнями по критерию изгибающего момента являются стержни приопорных панелей верхних поясов (рис. 13, 14). При этом стержни верхних поясов, смежные со стержнями приопорных панелей, имеют снижение значений до 1 %, что позволяет также отнести их к нагруженным элементам по критерию изгибающего момента.

Значения изгибающих моментов стержней срединных панелей верхних поясов по отношению к стержням приопорных панелей снижены практически на 22 %.

Наиболее нагруженным по критерию продольного усилия растяжения является стержень срединной панели нижнего пояса (рис. 15, 16).

Наиболее нагруженными стержнями по критерию продольного усилия сжатия являются стержни срединных панелей верхних поясов.

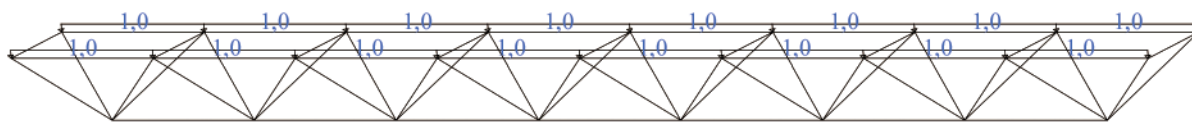


Рис. 11. Линейная единичная нагрузка расчетной модели

Fig. 11. Linear unit load of the calculated model

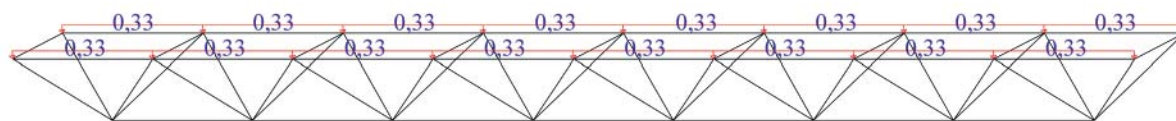


Рис. 12. Линейная приведенная нагрузка расчетной модели

Fig. 12. Linear reduced load of the calculated model

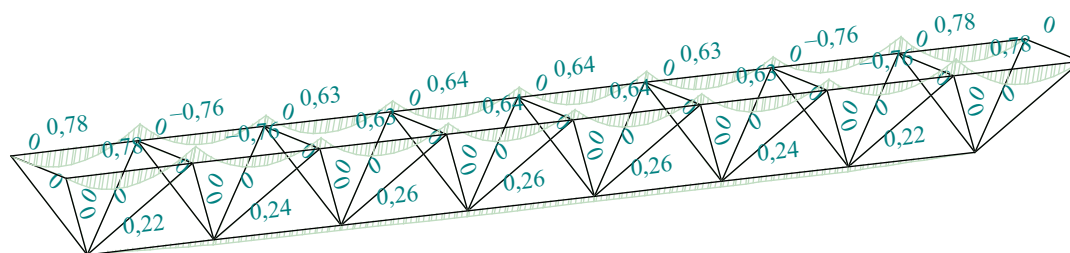


Рис. 13. Схема распределения изгибающих моментов в стержнях модели

Fig. 13. Scheme of the distribution of bending moments in the rods of the model

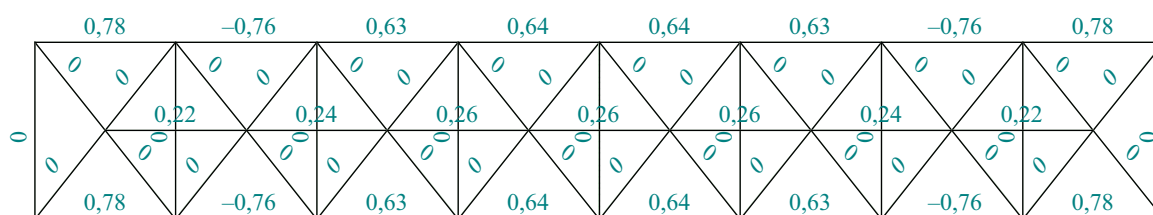


Рис. 14. Значения изгибающих моментов в стержнях модели (полуфермы)

Fig. 14. Values of bending moments in the rods of the model (semi-truss)

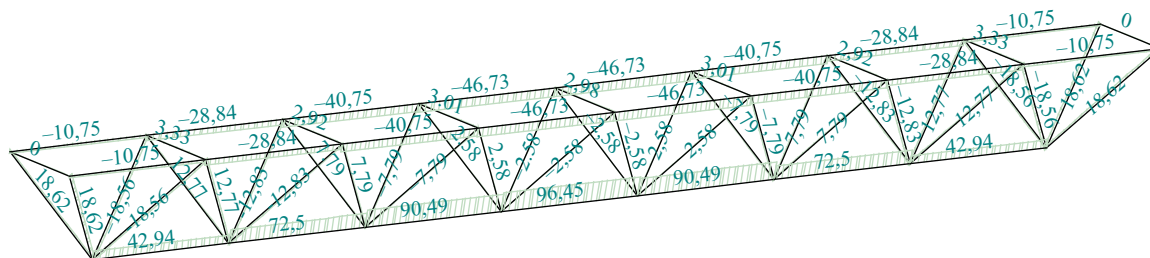


Рис. 15. Схема распределения продольных сил в стержнях модели

Fig. 15. Scheme of distribution of longitudinal forces in the rods of the model

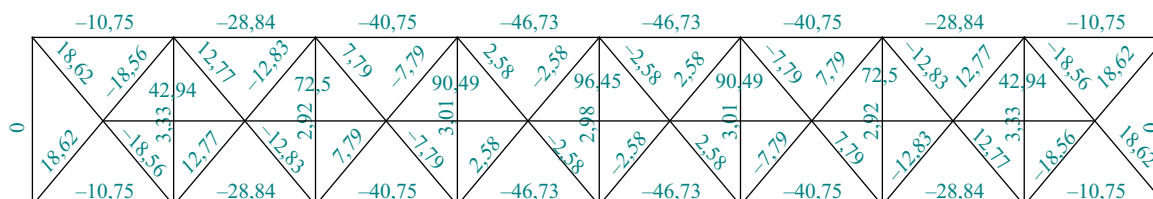


Рис. 16. Значение продольных сил в стержнях модели (полуфермы)

Fig. 16. The value of longitudinal forces in the rods of the model (semi-truss)

При этом отношение суммы модульных значений продольных усилий в верхних поясах к значению продольного усилия в нижнем поясе составляет:

$$\frac{\sum[N_c + N_c]}{N_p} = \frac{\sum[(-46,73) + (-46,73)]}{96,45} = 0,969,$$

где N_c — значение продольного усилия сжатия в неразрезном верхнем поясе, $-46,73$ кН; N_p — значение продольного усилия растяжения в неразрезном нижнем поясе, $96,45$ кН.

Соотношение значений продольных усилий сжатия в стержнях верхних поясов срединных панелей и стержнях приопорных панелей составляет:

$$\frac{N_{cc}}{N_{co}} = \frac{-46,73}{-10,75} = 4,347,$$

где N_{cc} — значение продольного усилия сжатия стержня срединной панели, $-46,73$ кН; N_{co} — значение продольного усилия сжатия стержня приопорной панели, $-10,75$ кН.

Соотношение значений продольных усилий растяжения в стержне нижнего пояса срединной панели и в стержне приопорной панели:

$$\frac{N_{pc}}{N_{po}} = \frac{96,45}{42,94} = 2,246,$$

где N_{pc} — значение продольного усилия растяжения стержня срединной панели, $96,45$ кН; N_{po} — значение продольного усилия растяжения стержня приопорной панели, $42,94$ кН.

Ряд соотношений значений продольных усилий в смежных стержнях верхних поясов:

$$\frac{N_{c,i+1}}{N_{c,i}};$$

$$\frac{-28,85}{-10,75} = 2,681; \frac{-40,75}{-28,85} = 1,412; \frac{-46,73}{-40,75} = 1,146,$$

где $N_{c,i+1}$ — значение продольного усилия сжатия стержня следующей смежной панели, кН; $N_{c,i}$ — значение продольного усилия сжатия стержня предыдущей смежной панели, кН.

Ряд соотношений значений продольных усилий в смежных стержнях нижнего пояса:

$$\frac{N_{p,i+1}}{N_{p,i}};$$

$$\frac{72,5}{42,94} = 1,688; \frac{90,49}{72,5} = 1,248; \frac{96,45}{90,49} = 1,066,$$

где $N_{p,i+1}$ — значение продольного усилия растяжения стержня следующей смежной панели, кН; $N_{p,i}$ — значение продольного усилия растяжения стержня предыдущей смежной панели, кН.

Таким образом, кратность увеличения значений продольных усилий в поясных стержнях снижается от приопорных панелей к середине пролета.

Наибольшие продольные усилия в раскосах приопорных панелей отличаются от значений усилий в раскосах срединных панелей в $7,217$ раз. Смежные сжатые и растянутые раскосы в пределах панели верхних поясов имеют одинаковые модульные значения продольных усилий.

Снижение значений усилий в стержнях раскосов смежных панелей, рассматривая от приопорных панелей, происходит также непропорционально, что показывает ряд соотношений значений продольных усилий растяжения в раскосах смежных панелей верхних поясов:

$$\frac{N_{pp,i+1}}{N_{pp,i}};$$

$$\frac{12,77}{18,62} = 0,686; \frac{7,79}{12,77} = 0,61; \frac{2,58}{7,79} = 0,331,$$

где $N_{pp,i+1}$ — значение продольного усилия растяжения стержня следующей смежной панели, кН; $N_{pp,i}$ — значение продольного усилия растяжения стержня предыдущей смежной панели, кН.

Кратность увеличения значений в стержнях раскосов понижается от приопорных панелей к середине пролета.

Оценка деформативности модели пролетной трехгранной фермы основана на суммарных значениях линейных перемещений узлов и их составляющих проекций (рис. 17).

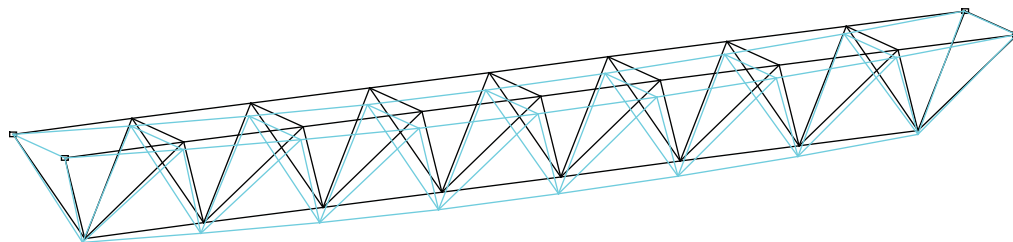


Рис. 17. Деформированная схема модели

Fig. 17. Deformed model diagram

Наибольшие значения вертикальных перемещений относятся к узлам нижнего и верхних неразрезных поясов в срединной части пролета трехгранной фермы. Необходимо отметить наличие полной симметрии в распределении значений вертикальных перемещений узлов относительно середины пролета (рис. 18).

Ряд соотношений значений вертикальных линейных перемещений узлов верхних поясов к их координатам:

$$\begin{aligned} \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i}; \frac{47,71}{3000} &= 15,903 \cdot 10^{-3}; \\ \frac{(85,43 - 47,71)}{6000} &= 6,286 \cdot 10^{-3}; \\ \frac{(109,93 - 85,43)}{9000} &= 2,722 \cdot 10^{-3}; \\ \frac{(118,37 - 109,93)}{12} &= 0,703 \cdot 10^{-3}, \end{aligned}$$

где z_i — модульное значение вертикального перемещения узла, мм; z_{i-1} — модульное значение вертикального перемещения предыдущего узла ($i - 1$), мм; x_i — координата узла при нулевой координате опорного узла, мм.

Ряд соотношений значений вертикальных линейных перемещений узлов нижнего пояса к их координатам:

$$\begin{aligned} \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i}; \frac{26,87}{1500} &= 17,913 \cdot 10^{-3}; \\ \frac{(68,86 - 26,87)}{4500} &= 9,331 \cdot 10^{-3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(99,48 - 68,86)}{7500} &= 4,082 \cdot 10^{-3}; \\ \frac{(115,25 - 99,48)}{10500} &= 1,502 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Уменьшение кратности значений соотношений вертикальных линейных перемещений узлов к их координатам свидетельствует об отсутствии пропорциональности.

Соответственно, для уточнения характера распределения значений вертикальных перемещений узлов использовалась расчетная модель трехгранной фермы с промежуточными узлами, установленными в серединах панелей нижнего и верхних поясов (рис. 19).

Следует отметить, что наибольшую часть суммарных значений перемещений узлов составляют их вертикальные перемещения (рис. 20). Исключение составляют опорные узлы.

Суммарные и вертикальные значения перемещений узлов середины пролета полностью совпадают. У опорных узлов полностью совпадают суммарные и горизонтальные продольные значения перемещений.

Значения перемещений нижнего и верхних поясов имеют распределение, указывающее принадлежность к пологим параболам с различной кривизной (рис. 21).

Отмечена полная симметрия в распределении значений поперечных горизонтальных перемещений узлов относительно продольной оси модели (рис. 22).

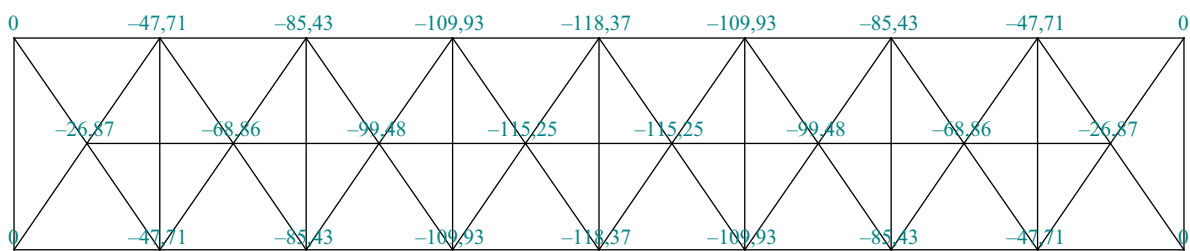


Рис. 18. Значения вертикальных перемещений узлов модели (полуфермы)

Fig. 18. Values of vertical displacements of model nodes (semi-truss)

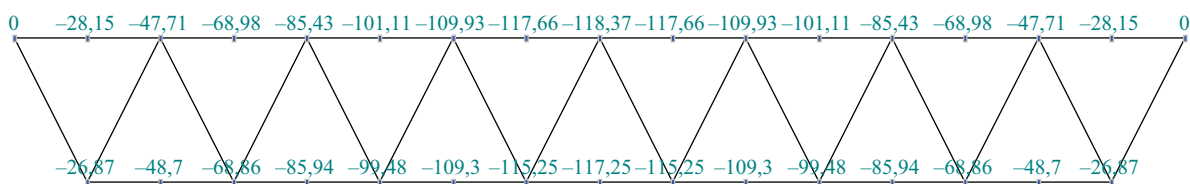


Рис. 19. Значения вертикальных перемещений модели полуфермы (вид сбоку)

Fig. 19. Values of vertical movements of the semi-truss model (side view)

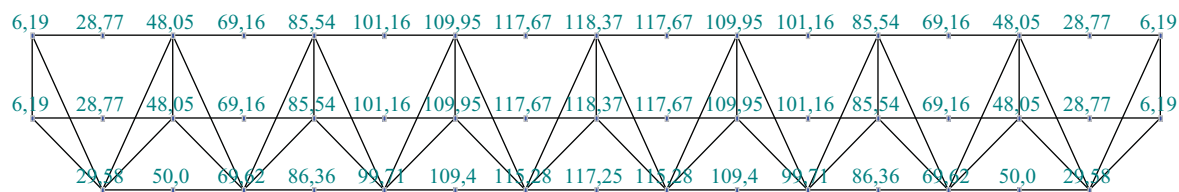
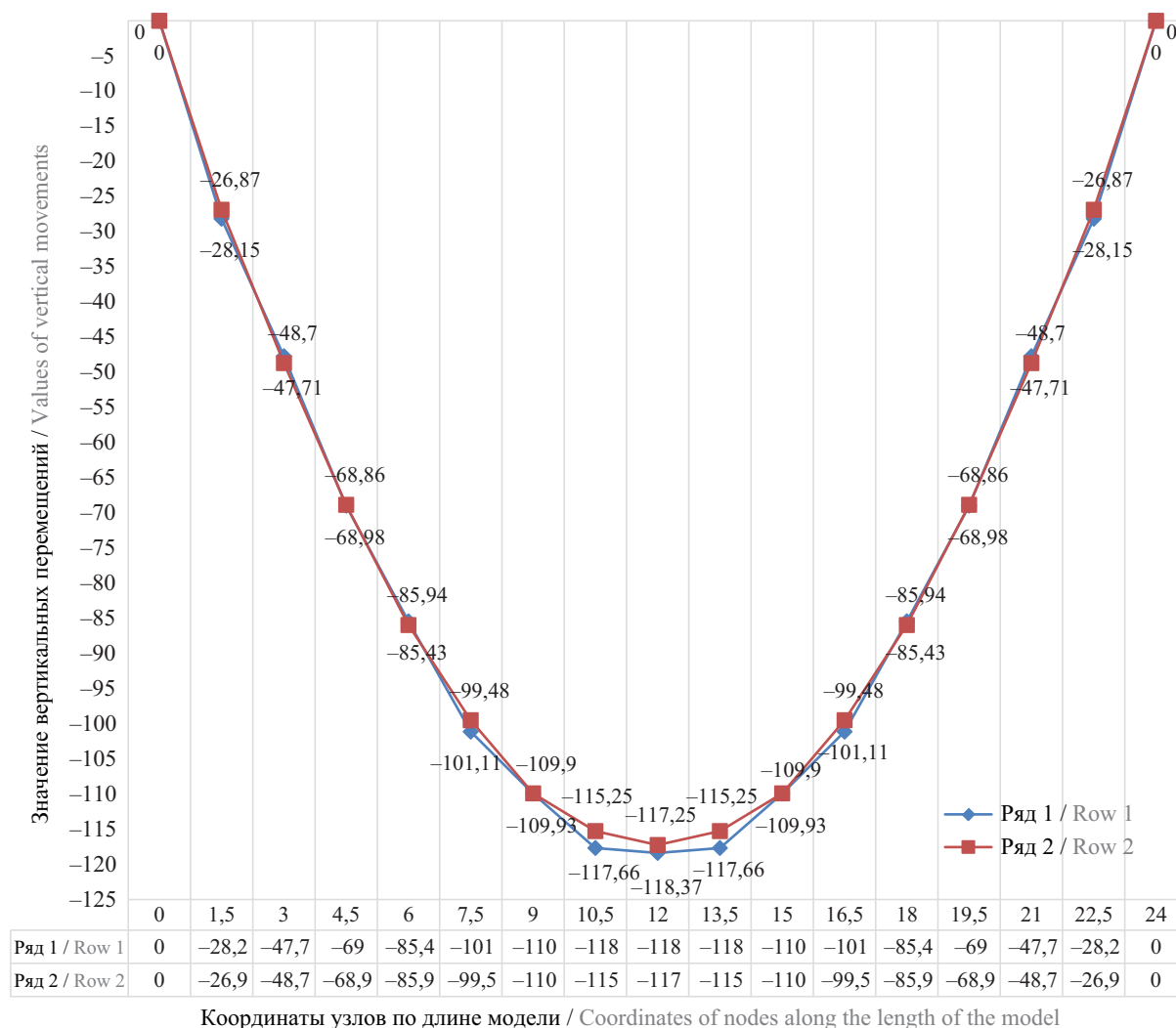


Рис. 20. Значения суммарных значений перемещений узлов вариативной модели

Fig. 20. Values of the total values of the displacements of the nodes of the variable model



Координаты узлов по длине модели / Coordinates of nodes along the length of the model

Рис. 21. График распределения значений вертикальных перемещений модели

Fig. 21. Graph of the distribution of the values of the vertical movements of the model

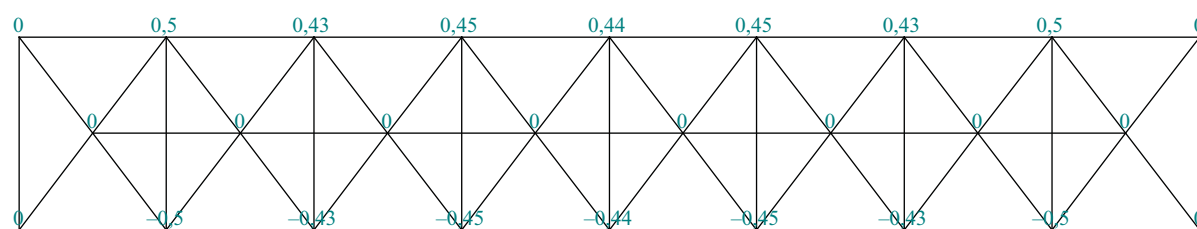


Рис. 22. Значения горизонтальных поперечных перемещений модели (полуфермы)

Fig. 22. Values of horizontal transverse displacements of the model (semi-truss)

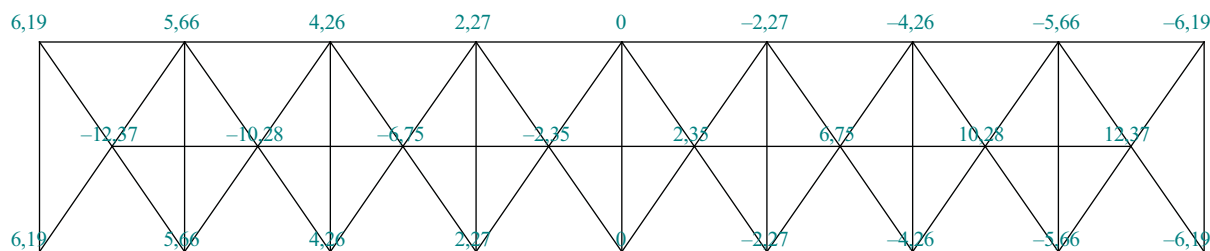


Рис. 23. Значения горизонтальных продольных перемещений модели при ограничении

Fig. 23. Values of horizontal longitudinal displacements of the model under constraint

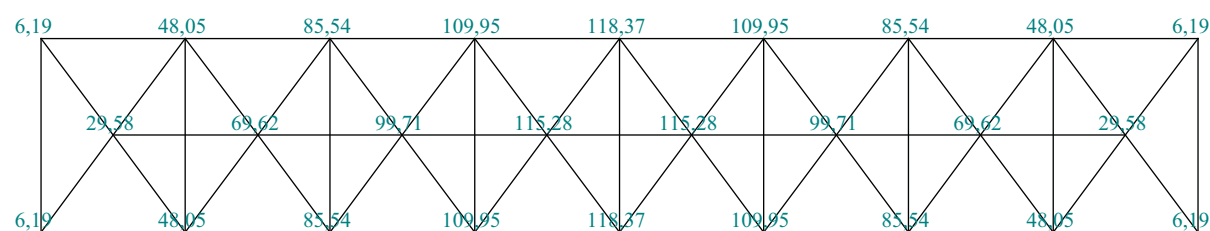


Рис. 24. Значения суммарных перемещений модели (полуфермы)

Fig. 24. Values of the total movements of the model (semi-truss)

В распределении значений горизонтальных продольных перемещений относительно продольной оси модели отсутствует симметрия относительно середины пролета при установлении граничных условий в пределах опорных узлов. При установлении граничных условий по смещению в продольном направлении (в направлении X) в центральных узлах верхних поясов распределение значений горизонтальных продольных перемещений приобретает симметричный характер (рис. 23).

Суммарные значения перемещений узлов трехгранной фермы описываются пологой параболой с вершиной в центральных узлах верхних поясов модели (рис. 24).

Сравнительный анализ результатов при воздействии приведенной нагрузки показал расхождение значений в пределах 1 %, что обусловлено соотношением $(1/3) \times 3 \approx 1$.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напряженно-деформированное состояние расчетной модели пролетной трехгранной фермы с неразрезными поясами отличается распределением основных усилий, характерным для плоских ферм, и при этом имеет ряд особенностей.

Распределение изгибающих моментов в неразрезных стержнях верхнего пояса соответствует форме, описывающей статическую работу многопролетной балки с равномерно распределенной

нагрузкой. Наиболее нагруженными стержнями по критерию изгибающего момента являются элементы приопорных панелей верхних поясов. Соотношение максимального и минимального значений изгибающего момента для неразрезных стержней верхних поясов составляет $0,78/0,63 = 1,238$. Соотношение максимальных значений изгибающего момента для неразрезных стержней верхнего и нижнего поясов — $0,78/0,26 = 3$.

Распределение продольных усилий в неразрезных поясных стержнях фиксируется характерной форме статической работы решетчатой балки. По критерию продольного усилия сжатия наиболее нагруженными являются стержни срединных панелей верхних поясов. Наиболее нагруженным по критерию продольного усилия растяжения является стержень срединной панели нижнего пояса. Соотношение значений продольных усилий сжатия в стержнях верхних поясов срединных панелей и приопорных панелей как соотношение максимального и минимального значений составляет 4,347. Соотношение значений продольных усилий растяжения в стержне нижнего пояса срединной панели и в стержне приопорной панели — 2,246.

Соотношение суммы модульных значений продольных усилий сжатия в верхних поясах к значению продольного усилия растяжения в нижнем поясе составляет 0,96875. Такое же соотношение для распределения продольных усилий в нижнем и верхнем поясах плоских ферм — 0,969.

Суммарные и вертикальные значения перемещений узлов середины пролета полностью совпада-

ют, что свидетельствует о принадлежности к общей линии вектора суммарных перемещений и радиуса кривизны парабола деформируемой схемы поясов в составе стержневой модели фермы. Соответственно, распределение суммарных значений перемещений узлов трехгранной фермы описывается пологими параболой с вершинами в середине пролета модели.

Полученные результаты расчетов вариативных моделей трехгранной фермы показывают отсутствие практического влияния на их деформативные свойства условий примыканий раскосов из одиночных прокатных уголков к неразрезным поясным стержням. Это подтверждает, что малая изгибная жесткость одиночных прокатных уголков по отношению к неразрезным стержням составного пятигранного сечения практически не оказывает влияния на распределение возникающих усилий в бесфасоночных узлах стержневой системы, основанной на компоновке центрированной геометрической схемы. Использование вариативных стержневых моделей с шарнирным примыканием раскосов к неразрезным поясным стержням целесообразно для получения адекватных результатов расчетной модели пролетной трехгранной фермы.

Исследования НДС модели трехгранной фермы позволили установить характер статической работы элементов, соединяющих верхние пояса, завершающие компоновку конструктивной жесткости. Исходя из условий статической работы, данные элементы работают на восприятие усилия растяжения, что дает возможность их обозначить затяжками, так как распорки работают на восприятие усилий сжатия. Однако обозначение этих элементов в качестве распорок вполне допустимо из условия компоновки в виде связевых элементов для сопряжения параллельных неразрезных стержней фермы.

Усилия в затяжках принятой конструкции пролетной фермы соответствуют значению суммарной линейной нагрузки смежных полупанелей верхнего пояса. Влияние на распределение усилий в затяжках по верхним поясам обусловлено особенностями пространственно-стержневой структуры геометрической схемы.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная пространственно-стержневая модель адекватно отражает НДС трехгранной фермы. Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для верификации данных последующих численных исследований, в том числе конструкций бесфасоночных узлов пластинчатой математической модели.

Предусмотренное методикой численных исследований использование метода единичных нагрузок позволяет произвести оценку реакции несущей системы в виде распределения усилий в стержнях и перемещений узлов. Этот подход имеет практическое применение в виде структурированного массива данных при расчетах по методу предельных состояний. Изменчивость значений нагрузок фиксируется модульными значениями конкретной комбинации с приведением к единичным значениям усилий рассматриваемых элементов системы согласно полученным результатам.

Представленные численные исследования входят в научный комплекс исследований по изучению действительной работы пролетных трехгранных ферм, в том числе конструкций трехгранных ферм с нижним поясом из одиночного уголка [31, 32]. Полученные данные составят основу систематизации исследований конструкций бесфасоночных узлов и внедрения их в практику проектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ищенко И.И., Кутухтин Е.Г., Спиридонов В.М., Хромец Ю.Н. Легкие металлические конструкции одноэтажных производственных зданий. М. : Стройиздат, 1979. 198 с.
2. Кутухтин Е.Г., Спиридонов В.М., Хромец Ю.Н. Легкие конструкции одноэтажных производственных зданий. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1988. 261 с.
3. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. М. : Стройиздат, 1983. 215 с.
4. Трофимов В.И., Мкрчанц Ю.С., Третьякова Э.В., Чернов Ю.А., Землеруб В.А., Секретов А.Н. и др. Структурные конструкции из прокатных профилей // Промышленное строительство. 1974. № 8. С. 37–42.
5. Трофимов В.И., Бегун Г.Б. Структурные конструкции. М. : Стройиздат, 1972. 272 с.
6. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М. : Стройиздат, 1974. 144 с.
7. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Диамант, 1994. 276 с.
8. Ильясевич С.А. Области применения трубчатых стальных конструкций // Стальные конструкции из труб : сб. ст. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1973. С. 5–10.
9. Чернов Ю.А., Третьякова Э.В., Диденко В.Н. Разработка, исследование и строительство структурных плит и оболочек // Основные направления развития стальных конструкций и современные методы их изготовления. Уникальные сооружения, массовые стальные конструкции, их типизация, расши-

рение областей применения стальных конструкций. Международная ассоциация по мостам и конструкциям. 1978. Т. 27. С. 325–338.

10. *Ильясевич С.А., Попов В.С.* Исследование эффективности применения тонкостенных труб повышенной и высокой прочности в большепролетных конструкциях покрытий промышленных зданий // Стальные конструкции из труб : сб. ст. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1973. С. 16–26.

11. *Лихтарников Я.М.* Металлические конструкции: методы технико-экономического анализа при проектировании. М. : Стройиздат, 1968. 264 с.

12. *Хисамов Р.И., Исаева Л.А.* Влияние конструктивных решений узлов на весовые показатели структурных покрытий // Исследование, расчет и испытание металлических конструкций. Казань : КИСИ, 1978. № 2. С. 44–48.

13. *Казарновский В.С.* Работоспособность сварных соединений замкнутых профилей в диапазоне климатических температур : автореф. дис... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1999. 39 с.

14. *Левитанский И.В.* Особенности конструирования и выполнения фланцевых соединений монтажных узлов стальных конструкций // Промышленное строительство. 1983. № 11. С. 7–10.

15. *Бирюлев В.В., Чернов И.Н.* Стальные фермы с коробчатыми сечениями стержней, сваренных из уголков // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1974. № 4. С. 8–14.

16. *Цетлин Б.С., Гукова М.И., Иммерман А.Г., Тесленко Г.В.* Работа и расчет узловых соединений гнутосварных профилей // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1979. № 6. С. 8–13.

17. Патент RU № 36119 U1 МПК7 E04C 3/32. Тонкостенная несущая конструкция замкнутого пятигранного сечения (ее варианты) / М.М. Копытов, А.П. Малиновский, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2003118832/20 от 24.06.2003, опубл. 27.02.2004. Бюл. № 6. 6 с.

18. Патент RU № 2661945 C1. Покрытие из трехгранных ферм / Е.А. Мелёхин, С.В. Фирцева; 23.07.2018, опубл. 23.07.2018. Бюл. № 21.

19. Патент RU № 2188287 C2 МПК7 E04C 3/04. Покрытие из трехгранных ферм / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2000117116/03 от 27.06.2000; опубл. 27.08.2002. Бюл. № 24. 6 с.

20. *Мелёхин Е.А.* Модульные трехгранные фермы плоских покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 65–78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78

21. *Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф.* Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. М. : Изд-во АСВ, 2007. 478 с.

22. *Перельмутер А.В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев : Сталь, 2002. 600 с.

23. *Latif M., Nasir A.* Decentralized stochastic control for building energy and comfort management // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24. P. 100739. DOI: 10.1016/j.job.2019.100739

24. *Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V.* Ventilated façade integrated with the HVAC system for cold climate // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 1 (77). Pp. 47–58. DOI: 10.18720/MCE.77.5

25. *Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al.* A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25. P. 100772. DOI: 10.1016/j.job.2019.100772

26. *Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J.* Overview of computational intelligence for building energy system design // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

27. *Поляков Л.П., Файнбург В.М.* Моделирование строительных конструкций. Киев : Будівельник, 1975. 159 с.

28. *Devloo P.R.B., Faria C.O., Farias A.M., Gomes S.M., Loula A.F.D., Malta S.M.C.* On continuous, discontinuous, mixed, and primal hybrid finite element methods for second-order elliptic problems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2018. Vol. 115. Issue 9. Pp. 1083–1107. DOI: 10.1002/nme.5836

29. *Bishay P., Sládek J., Sládek V., Gao X.* Analysis of elastic media with voids using a mixed-collocation finite-element method // Journal of Engineering Mechanics. 2017. Vol. 143 (4). P. 04016119. DOI: 10.1061/(ASCE)JEM.1943-7889.0001193

30. *Спенглер И.Е., Шейнфельд Н.М., Сургучев В.Д., Лукьяненко Е.П.* О работе опорных узлов стропильных ферм из труб // Стальные конструкции из труб : сб. ст. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1973. С. 45–57.

31. *Мелёхин Е.А., Иванов П.С., Малыгин А.Б.* Численные исследования модульных систем трехгранных ферм плоских покрытий зданий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2022/7687

32. *Мелёхин Е.А., Гончаров Н.В., Малыгин А.Б.* Трехгранные фермы с предварительным напряжением для плоских покрытий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n6y2022/7704>

Поступила в редакцию 2 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 21 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Евгений Анатольевич Мелёхин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 381648, ResearcherID: AFK-2034-2022, ORCID: 0000-0002-9606-7191; melean@mail.ru.

REFERENCES

1. Ishchenko I.I., Kutukhtin E.G., Spiridonov V.M., Khromets Yu.N. *Light metal structures of one-story industrial buildings*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979; 196. (rus.).
2. Kutukhtin E.G., Spiridonov V.M., Khromets Yu.N. *Light structures of one-story industrial buildings. 2nd ed., revised. and additional*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 261. (rus.).
3. Trushchev A.G. *Spatial metal structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 215. (rus.).
4. Trofimov V.I., Mkrchants Yu.S., Tret'yakova E.V., Chernov Yu.A., Zemlerub V.A., Sekretov A.N. et al. Structural structures from rolled profiles. *Industrial Construction*. 1974; 8:37-42. (rus.).
5. Trofimov V.I., Begun G.B. *Structural designs*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972; 272. (rus.).
6. Kikin A.I., Sanzharovsky R.S., Trul V.A. *Structures made of steel pipes filled with concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974; 144. (rus.).
7. Klyachin A.Z. *Metal lattice spatial structures of a regular structure (development, research, application experience)*. Ekaterinburg, Diamant Publ., 1994; 276. (rus.).
8. Ilyasevich S.A. Areas of application of tubular steel structures. *Steel structures from pipes : collection of articles TsNIISK named after V.A. Kucherenko*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973; 5-10. (rus.).
9. Chernov Yu.A., Tretyakova E.V., Didenko V.N. Development, research and construction of structural plates and shells. *Main directions of development of steel structures and modern methods of their manufacture. Unique structures, mass steel structures, their typification, expansion of the scope of steel structures. International Association for Bridges and Structures*. 1978; 27:325-338. (rus.).
10. Ilyasevich S.A., Popov V.S. Investigation of the effectiveness of the use of thin-walled pipes of increased and high strength in large-span structures of coatings of industrial buildings. *Steel structures from pipes : collection of articles TsNIISK named after V.A. Kucherenko*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973; 16-26. (rus.).
11. Likhtarnikov Ya.M. *Metal structures: methods of technical and economic analysis in the design*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968; 264. (rus.).
12. Khisamov R.I., Isaeva L.A. Influence of constructive solutions of nodes on the weight indicators of structural coatings. *Research, calculation and testing of metal structures*. Kazan, KISI, 1978; 2:44-48. (rus.).
13. Kazarnovsky V.S. *Performance of welded joints of closed profiles in the range of climatic temperatures : abstract dis. ... doctor of technical sciences*. Novosibirsk, 1999; 39. (rus.).
14. Levitsky I.V. Features of the design and implementation of flange connections of mounting units of steel structures. *Industrial Construction*. 1983; 11:7-10. (rus.).
15. Biryulev V.V., Chernov I.N. Steel girders with box sections of rods welded from angles. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1974; 4:8-14. (rus.).
16. Tsetlin B.S., Gukova M.I., Immerman A.G., Teslenko G.V. Work and calculation of nodal joints of bend-welded profiles. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1979; 6:8-13. (rus.).
17. Patent RU No. 36119 U1 MPK7 E04C 3/32. *Thin-walled load-bearing structure of a closed five-sided section (its variants)* / M.M. Kopytov, A.P. Malinovsky, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; dec. No. 2003118832/20 dated 06/24/2003, publ. 02/27/2004. Bull. No. 6; 6. (rus.).
18. Patent RU No. 2661945 C1. *Trihedral truss coating* / E.A. Melekhin, S.V. Firtsev; 07/23/2018, publ. 07/23/2018. Bull. No. 21. (rus.).
19. Patent RU No. 2188287 C2 MPK7 E04C 3/04. *Trihedral truss coating* / M.M. Kopytov, K.A. Erokhin, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; dec. No. 2000117116/03 dated 06/27/2000; publ. 08/27/2002. Bull. No. 24; 6. (rus.).
20. Melekhin E.A. Modular trihedral trusses of flat roofs. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2021; 23(2):65-78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78 (rus.).
21. Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinsky V.A., Perelmutter A.V., Pichugin S.F. *Loads and impacts on buildings and structures*. A.V. Perelmutter (ed.). Moscow, ASV Publishing House, 2007; 478. (rus.).

22. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of structures and the possibility of their analysis*. Kyiv, Steel, 2002; 600. (rus.).
23. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100739. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100739
24. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated façade integrated with the HVAC system for cold climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1(77):47-58. DOI: 10.18720/MCE.77.5
25. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25:100772. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100772
26. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 108:76-90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018
27. Polyakov L.P., Fainburg V.M. *Modeling of building structures*. Kyiv, Budivelnik, 1975; 159. (rus.).
28. Devloo P.R.B., Faria C.O., Farias A.M., Gomes S.M., Loula A.F.D., Malta S.M.C. On continuous, discontinuous, mixed, and primal hybrid finite element methods for second-order elliptic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 115(9):1083-1107. DOI: 10.1002/nme.5836
29. Bishay P., Sládek J., Sládek V., Gao X. Analysis of elastic media with voids using a mixed-collocation finite-element method. *Journal of Engineering Mechanics*. 2017; 143(4):04016119. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001193
30. Spengler I.E., Sheinfeld N.M., Surguchev V.D., Lukyanenko E.P. On the operation of the support units of truss trusses from pipes. *Steel structures from pipes : collection of articles TsNIISK named after V.A. Kucherenko*. Moscow, Stroyizdat, 1973; 45-57. (rus.).
31. Melekhin E.A., Ivanov P.S., Malygin A.B. Numerical studies of modular systems of trihedral trusses of flat roofs of buildings. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687 (rus.).
32. Melekhin E.A., Goncharov N.V., Malygin A.B. Prestressed triangular trusses for flat roofs. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7704> (rus.).

Received January 2, 2023.

Adopted in revised form on February 21, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S : **Evgeniy A. Melyokhin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and building design and environmental physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 381648, ResearcherID: AFK-2034-2022, ORCID: 0000-0002-9606-7191; melean@mail.ru.

Логарифмический декремент колебаний мостов из алюминиевых сплавов

Андрей Валентинович Коргин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены материалы теоретического анализа и результаты экспериментальных исследований по определению значений логарифмического декремента колебаний мостов из алюминиевых сплавов, который является ключевым фактором при расчетах мостовых конструкций на динамические воздействия. В нормативной документации РФ по проектированию мостов из алюминиевых сплавов отсутствуют данные для определения логарифмического декремента колебаний.

Материалы и методы. Проанализированы факторы, влияющие на значения логарифмического декремента мостовых конструкций из алюминиевых сплавов. Приведены результаты анализа натурных исследований динамических параметров трех пешеходных мостов из алюминиевого сплава 1915 Т1: моста пролетом 40,1 м через Рязанскую ул. в г. Тула и двух мостов с пролетами 10 м в пойме р. Яуза в г. Москве, проведенных НИУ МГСУ в 2020 г. Мосты имеют несущие конструкции в форме вертикальных боковых ферм с треугольной раскосной решеткой. Для выявления значений собственных частот мосты исследовались в режиме собственных колебаний, вызванных ударными воздействиями. Регистрировались скорости перемещений характерных точек мостов, на основании которых после компьютерной обработки вычислялись значения частот и декрементов собственных колебаний.

Результаты. Установлено, что каждой частоте собственных колебаний соответствует собственное значение декремента. При увеличении длины пролета мостов значения собственных частот и соответствующих им значений декрементов существенно снижаются, на значения декрементов для первой частоты влияют условия опирания, для второй частоты значения декрементов зависят только от свойств материала и конструктивного решения.

Выводы. Уменьшение значений декремента колебаний ведет к повышению расхода материалов для обеспечения нормативных условий эксплуатации. При проектировании сложных и ответственных мостовых сооружений с использованием высокопрочных алюминиевых сплавов значения декремента следует устанавливать в ходе научно-технического сопровождения и экспериментальных исследований данных марок сплавов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мост, сооружение, несущая конструкция, алюминиевый сплав, напряженно-деформированное состояние, динамический коэффициент, собственная частота, демпфирование, логарифмический декремент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коргин А.В. Логарифмический декремент колебаний мостов из алюминиевых сплавов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 572–583. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.572-583

Автор, ответственный за переписку: Андрей Валентинович Коргин, korguine@mgsu.ru.

Logarithmic decrement of vibrations of aluminum alloy bridges

Andrey V. Korgin

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the materials of theoretical analysis and the results of experimental studies of determining the values of the logarithmic decrement of vibration of aluminum alloy bridges, which is a key factor in calculations of bridge structures for dynamic effects. In the regulatory documentation of the Russian Federation on design of aluminum alloy bridges, there are no data for determination of logarithmic decrement of vibration. The content presents the results of research on this issue and recommendations for eliminating this shortcoming and improving the current regulatory documentation of the Russian Federation.

Materials and methods. The factors influencing the values of the logarithmic decrement of aluminum bridge structures have been studied, recommended values of the logarithmic decrement of bridge vibrations depending on the materials used and design solutions are given. The results of analysis of field researches of dynamic parameters of three pedestrian bridges made of aluminum alloy 1915 T1: the bridge with a span of 40.1 m across Ryazanskaya st. in Tula and two bridges with span of 10 m in the floodplain of the Yauza river in Moscow, conducted by the NRU MGSU in 2020 are presented. The bridges have load-bearing structures in the form of vertical side trusses with a triangular diagonal lattice. To identify the values of natural frequencies the bridges were studied in the mode of natural vibrations caused by impact force. Velocities of the motions of characteristic points of the bridges were recorded on the basis of which after computer processing the values of frequencies and decrements of natural vibrations have been calculated.

Results. During dynamic tests of the studied aluminum alloy bridges 1915 T1, it has been established that each frequency of the natural vibration corresponds to the value of decrement. By increasing the bridge span values of natural frequencies and their corresponding decrement values significantly decrease, the values of the decrements for the first frequency are affected by the supporting conditions, for the second frequency, the values of the decrements depend only on the material properties and the construction solution.

Conclusions. Decrease of vibration decrement values leads to increase of material consumption to ensure standard operating conditions. When designing complex and critical bridge structures using high-strength aluminum alloys the decrement values should be established in the course of scientific and technical support and experimental research of these alloy grades.

KEYWORDS: bridge, structure, load-bearing structure, aluminum alloy, stress-strain state, dynamic coefficient, natural frequency, damping, logarithmic decrement

FOR CITATION: Korgin A.V. Logarithmic decrement of vibrations of aluminum alloy bridges. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):572-583. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.572-583 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Korgin, korguine@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных тенденциях мирового и отечественного мостостроения все большее распространение получает строительство пешеходных и автомобильных мостов из алюминиевых сплавов, обладающих рядом преимуществ перед мостами из традиционных материалов — стали, железобетона и дерева. Это малый вес, высокая удельная прочность, повышенная коррозионная стойкость, сокращение сроков строительства за счет упрощенной транспортировки и быстроты монтажа крупногабаритных фрагментов, эстетичный внешний вид и невысокие затраты на эксплуатацию [1, 2].

Действующая в настоящее время нормативная документация РФ, регламентирующая строительство мостов из различных материалов^{1, 2, 3}, находится в стадии совершенствования и не в полной мере отражает все особенности использования алюминиевых сплавов в мостостроении, в особенности в части строительства автомобильных мостов, которое тем не менее уже начато в РФ⁴.

В процессе эксплуатации мостовые сооружения подвергаются воздействию динамических нагрузок от движения автотранспорта, пешеходов и действия ветра, приводящих к возникновению колебаний несущих конструкций, которые должны быть учтены при их расчетах. В основном нормативном документе РФ, регламентирующем нагрузки на сооружения, отсутствуют положения по учету параметров динамических нагрузок на конструкции из алюминиевых сплавов¹.

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*.

² СП 128.13330.2016. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06–85.

³ СП 35.13330.2016. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*.

⁴ «Как в Европе и Японии»: почему России нужен автомобильный мост из алюминия. Перспективы развития мостостроения в РФ // Newslab.ru. URL: Newslab.ru/article/1022611

При колебаниях конструкций их движущаяся масса создает силы инерции, которые, складываясь с действующей статической эксплуатационной нагрузкой, приводят к значениям параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) — напряжений, деформаций, перемещений, способных существенно превышать их же значения при статическом нагружении.

Для учета динамических воздействий на мостовые сооружения в расчетах используется так называемый динамический коэффициент $K_{дин} > 1$ (коэффициент динамичности), на который умножаются значения статических составляющих от данных воздействий. Достигаемые при этом параметры НДС не должны превышать допускаемые значения прочности материалов сооружения и его интегральных перемещений (прогибов)³.

Динамические нагрузки могут носить случайный или периодический характер воздействия, описываемый частотами и амплитудами их изменений.

При периодическом характере действия динамических нагрузок они становятся все более опасными по мере приближения частот их изменений к значениям собственных частот колебаний конструкции. При совпадении частоты изменения возмущающего воздействия с одной из собственных частот возникает явление резонанса, сопровождающееся наиболее высоким уровнем параметров НДС, в большинстве случаев являющихся недопустимым из-за опасности разрушения конструкции или невозможности ее нормативной эксплуатации [3, 4].

Значение коэффициента динамичности $K_{дин}$ при периодических воздействиях на мостовые конструкции напрямую зависит от способности материала конструкций поглощать (демпфировать) энергию, передаваемую конструкции возмущающим воздействием. Данная способность отражается параметром, называемым декрементом колебаний δ , который является основным параметром при вычислении коэффициента динамичности $K_{дин}$, определяющим уровень НДС при динамическом нагружении мостовых конструкций³.

Значение декремента колебаний δ мостового сооружения зависит от многих факторов — назначения и конструктивной схемы моста, действующих нагрузок, используемых материалов, типов соединений, условий опирания и факторов взаимодействия с окружающей средой.

Низкие значения декремента δ при динамическом нагружении приводят к высоким значениям динамического коэффициента $K_{дин}$ и, соответственно, к более высоким значениям параметров НДС, что требует повышенного расхода материалов для обеспечения безопасной эксплуатации сооружения. По этой причине повышение значений декремента при проектировании мостов является одной из задач проектировщиков.

В первую очередь декремент колебаний неразрывно связан с частотами собственных колебаний мостовой конструкции. Для разных частот собственных колебаний конструкции декремент колебаний может существенно различаться [5].

При совпадении частот динамического воздействия с одной из собственных частот колебаний конструкции — резонансе наиболее вероятным и более опасным является резонанс по первой частоте собственных колебаний, поэтому во многих случаях при расчетах мостовых конструкций на динамические воздействия ограничиваются принятием конструктивных мер для снижения эффекта или недопущения резонанса по первой частоте. Однако для более ответственных мостовых сооружений при проектировании должна учитываться возможность резонанса по второй частоте собственных колебаний и соответственно необходимо знать значения декремента колебаний по данной частоте³.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математические основы учета явления демпфирования

Явление демпфирования наиболее явно проявляется в виде затухания амплитуды свободных

колебаний во времени по причине потери энергии, сообщенной конструкции в момент возбуждения свободных колебаний [6–8].

Для системы с первой степенью свободы с сосредоточенной массой m с учетом внутреннего трения уравнение движения после прекращения возбуждающего воздействия имеет вид однородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$y'' + 2\alpha y' + \omega^2 y = 0, \quad (1)$$

где y — амплитуда свободных колебаний; $\alpha = k/2m$ — коэффициент затухания свободных колебаний; k — коэффициент внутреннего трения материала; ω — круговая частота свободных колебаний, рад/с.

Его решение известно и имеет вид:

$$y = a_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

где a_0 — начальное значение амплитуды колебаний; t — время колебаний, с; φ_0 — начальный сдвиг фаз, характеризующий положение массы в момент начала свободных колебаний, рад.

Выражение (1) представляет собой уравнение свободных затухающих колебаний упругой системы с первой степенью свободы, типичный график (виброграмма) которых приведен на рис. 1.

Логарифмический декремент колебаний δ — натуральный логарифм отношения двух последовательных однозначных амплитуд a_i и a_{i+1} с интервалом периода колебаний T :

$$\delta = \ln \frac{a_i}{a_{i+1}} = \ln \frac{e^{-\alpha t_i}}{e^{-\alpha t_{i+1}}} = \ln e^{\alpha(t_{i+1}-t_i)} = \ln e^{\alpha T} = \alpha \cdot T. \quad (3)$$

Логарифмический декремент колебаний характеризует скорость затухания свободных колебаний в упругой системе и является функцией свойств материала, формы конструкции, особенностей ее взаимодействия с элементами окружающей среды. Его конкретное численное значение определяется на основе анализа виброграмм свободных колебаний (рис. 1), зарегистрированных эксперименталь-

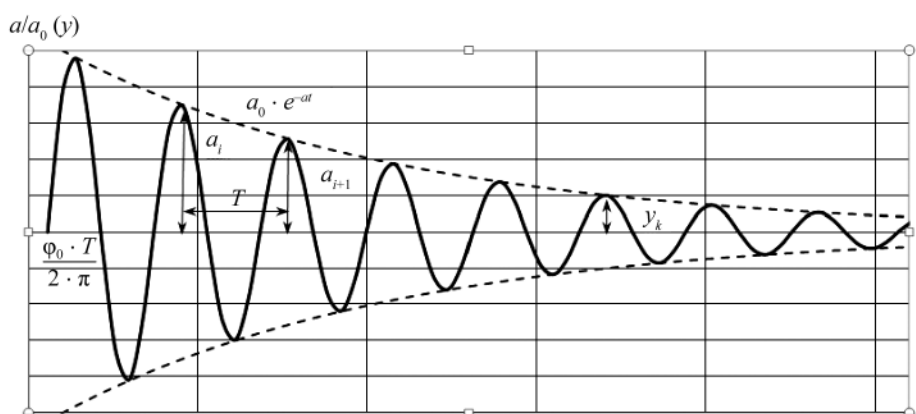


Рис. 1. Виброграмма свободных колебаний системы с первой степенью свободы

Fig. 1. Vibration diagram of free vibrations of a system with the first degree of freedom

но в процессе испытаний реальных конструкций на динамические воздействия. Выражение, используемое для практического вычисления δ :

$$\delta = \frac{1}{k-i} \cdot \ln \frac{a_i}{a_k}. \quad (4)$$

При вынужденных колебаниях под действием гармонически изменяющейся внешней силы P уравнение (1) приобретает вид:

$$y'' + 2 \cdot \alpha \cdot y' + \omega^2 \cdot y = \frac{P_0}{m} \cdot \sin(\theta \cdot t), \quad (5)$$

где P_0 — амплитуда вынуждающей силы; θ — круговая частота вынуждающей силы, рад/с.

Рост амплитуды вынужденных колебаний y относительно перемещения от статического действия силы P_0 — $y_{ст}$ выражает динамический коэффициент $K_{дин}$:

$$K_{дин} = \frac{y}{y_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \frac{\theta^2}{\omega^2}}}, \quad (6)$$

где $\gamma = \delta/\pi$ — так называемый коэффициент неупругого сопротивления.

Резонанс — явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частот свободных колебаний конструкции ω и вынуждающей силы θ . Из выражения (6) видно, что при совпадении частот свободных и вынужденных колебаний $\theta = \omega$ динамический коэффициент $K_{дин}$ зависит только от коэффициента неупругого сопротивления γ (при $\gamma = 0 \Rightarrow K_{дин}$ стремится к ∞ , рис. 2).

Зона резонанса ограничивается следующим условием:

$$0,7 \leq \theta/\omega \leq 1,3. \quad (7)$$

В общем случае эксплуатация конструкций при колебаниях в недопустимой на практике зоне резонанса запрещена, поэтому осуществляются следующие действия:

• ограничивается сверху или снизу частота вынуждающей силы θ в соответствии с условием (7);

• проводятся конструктивные мероприятия для изменения частоты свободных колебаний конструкции ω путем коррекции ее массы;

• увеличивается значение коэффициента неупругого сопротивления γ путем установки демпфирующих устройств (амортизаторов).

Логарифмический декремент мостов из алюминиевых сплавов

В общем случае для мостов любого типа логарифмический декремент колебаний может быть представлен в виде суммы потерь сообщенной внешним воздействием энергии от следующих составляющих демпфирования:

$$\delta = \delta_k + \delta_s + \delta_a + \delta_d, \quad (8)$$

где δ_k — в конструктивных элементах и соединениях пролетных конструкций; δ_s — от взаимодействия с основанием; δ_a — от аэродинамического взаимодействия с окружающей средой; δ_d — от специальных мероприятий (установка амортизаторов).

Демпфирование колебаний в самой конструкции δ_k (конструкционный декремент) происходит за счет потерь от возникновения внутреннего трения в материале при деформировании конструктивных элементов, приводящего к повышению их температуры, и трения в узловых соединениях, особенно болтового и заклепочного типа.

Конструкционный декремент колебаний δ_k в значительной степени зависит от уровня нагружения и возрастает с ростом напряжения цикла, также на него существенно влияет уровень предварительного пластического деформирования, которое испытывали элементы конструкций при изготовлении. Это видно из представленной на рис. 3 зависимости логарифмического декремента от уровня на-

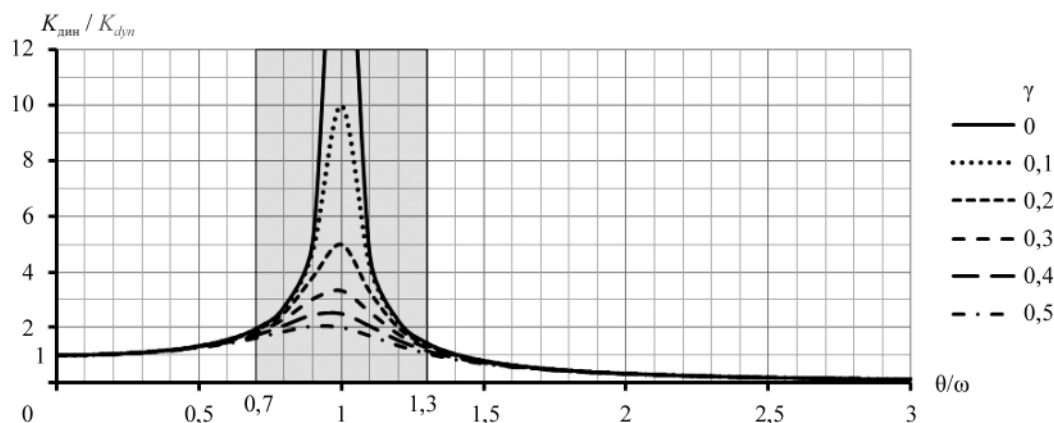


Рис. 2. Динамический коэффициент $K_{дин}$ при вынужденных колебаниях

Fig. 2. Dynamic coefficient $K_{дин}$ under forced vibrations

пряжений цикла для алюминиевого сплава АМг-6, полученной при поперечных колебаниях призматических образцов в условиях чистого изгиба [9, 10].

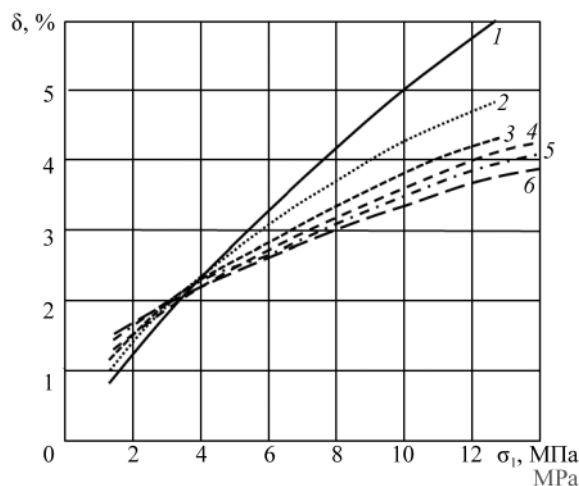


Рис. 3. Зависимость логарифмического декремента от уровня напряжений цикла для алюминиевого сплава АМг-6 при предварительном воздействии деформациями растяжением: 1 — исходное состояние; 2 — 1,5 %; 3 — 4,5 %; 4 — 7,5 %; 5 — 12,5 %; 6 — 17 %

Fig. 3. The dependence of the logarithmic decrement on the stress level of the cycle for aluminum alloy АМg-6 with preliminary exposure to tensile deformations: 1 — initial state; 2 — 1.5 %; 3 — 4.5 %; 4 — 7.5 %; 5 — 12.5 %; 6 — 17 %

При уровне циклических напряжений, близких к пределу выносливости, демпфирующая способность материала возрастает за счет деградации структуры, что приводит к росту декремента колебаний. При этом значения декремента зависят от вида циклических напряжений, изгибных, продольных или крутильных. Также значения декремента существенно зависят от исходного состояния алюминиевого сплава и температуры эксплуатации [11].

Болтовые и заклепочные соединения элементов мостовых конструкций также являются источниками значительного поглощения сообщаемой мосту возмущающим воздействием энергии за счет трения в соединяемых поверхностях конструктивных элементов. Величина поглощаемой болтовыми и заклепочными соединениями энергии зависит от конструктивного решения узловых соединений.

С другой стороны, обеспечение жесткости соединительных узлов имеет приоритетное значение для надежности эксплуатации мостовых конструкций, поэтому для предотвращения подвижности узловых соединений применяются соединения на высокопрочных болтах, заметно снижающих потери от трения в узлах по сравнению с обычными болтами и заклепками².

Приближенные значения конструкционного логарифмического декремента колебаний δ_k для основной формы колебаний мостовых конструкций из различных материалов приведены в табл. 1, составленной на основании источников^{5, 6}.

Конструкционные декременты колебаний мостов из алюминиевых сплавов в целом выше, чем у стальных мостов. Это объясняется наличием в алюминиевых сплавах более высоких, по сравнению со сталью, внутренних неупругих сопротивлений, являющихся одной из причин затухания колебаний. Значения коэффициентов поглощения энергии, соответствующие большинству пригодных для мостостроения алюминиевых сплавов, в 2–4 раза выше, чем у используемых мостовых сталей, и логарифмический декремент колебаний мостов из алюминиевых сплавов также почти вдвое больше. При одинаковой жесткости стальных и алюминиевых мостовых конструкций время затухания собственных колебаний последних существенно меньше. Однако с ростом прочности алюминиевых сплавов и жесткости изготавливаемых из них конструкций наблюдается тенденция к снижению демпфирующей способности⁵.

Следует иметь в виду, что в ходе эксплуатации при циклическом нагружении происходит рост значений логарифмического декремента элементов конструкций из алюминиевых сплавов вследствие накопления повреждений структуры самого сплава, что ведет к уменьшению значений динамического коэффициента $K_{дин}$.

Часть потерь энергии колебаний мостовых конструкций δ_s передается и гасится в опорных конструкциях, состоящих, как правило, из железобетонных элементов, опирающихся, в свою очередь, на грунтовое или скальное основание, обладающих более высокими поглощающими энергию параметрами, чем металлическая конструкция пролетного строения. Это в целом снижает общее значение декремента колебаний моста δ . В ряде случаев опорная составляющая декремента δ_s , например при экспериментальном определении значения декремента, рассматривается как составляющая конструктивного декремента δ_k и численно входит в его значение [12, 13].

Другая часть потерь энергии колебаний пролетных мостовых конструкций δ_a , в особенности имеющих пространственную ферменную или подвесную структуру, передается и поглощается окружающей мост влаговоздушной средой. Колеблущи-

⁵ Еврокод EN 1991-1-4-2009.

⁶ Технический отчет по заказу АО «Русал ТД» о выполнении работ на тему: «Разработка свода правил “Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования”» в рамках программы мероприятий по расширению действия и актуализации свода правил на автомобильные мосты. М. : НИУ МГСУ, 2020. 540 с.

Табл. 1. Приближенные значения конструкционного декремента δ_k для мостовTable 1. Approximate values of the structural decrement δ_k for bridges

Тип мостового сооружения Type of bridge structure		Конструкционный декремент δ_k Structural decrement δ_k
Стальные мосты Steel bridges	Сварные узлы / Welded assemblies	0,02
	Узлы на высокопрочных болтах / Assemblies on high-strength bolts	0,03
	Узлы на обыкновенных болтах / Assemblies on ordinary bolts	0,05
Сталежелезобетонные мосты / Steel-reinforced concrete bridges		0,04
Железобетонные мосты Reinforced concrete bridges	С преднапряженной арматурой без трещин With prestressed reinforcement without cracks	0,04
	Без преднапряженной арматуры с трещинами Without prestressed reinforcement with cracks	0,10
	Усиленные стеклопластиковым волокном Reinforced with fiberglass fiber	0,04–0,08
Деревянные мосты / Wood bridges		0,06–0,12
Мосты из алюминиевых сплавов Bridges made of aluminium alloy	С дорожным покрытием из алюминиевых сплавов With a road surface made of aluminum alloys	0,05–0,07
	С синтетическим или деревянным дорожным покрытием With synthetic or wooden road surface	0,06–0,08
	С асфальтобетонным покрытием толщиной 10 см With asphalt concrete coating thickness of 10 cm	0,10–0,12
	Реконструируемые железобетонные мосты с дорожным полотном из ортотропных плит, выполненных из алюминиевых сплавов, с асфальтобетонным покрытием Reconstructed reinforced concrete bridges with a roadbed made of orthotropic plates made of aluminum alloys, with asphalt concrete coating	0,18–0,22

еся поверхности конструктивных элементов моста приводят в движение окружающие их частицы влаговоздушной среды, что ведет к образованию в данной среде акустических волн, поглощающих часть энергии колебаний, сообщенных мосту возмущающим воздействием.

В свою очередь, численное значение составляющей логарифмического декремента от ветрового воздействия δ_a является необходимым параметром для расчета мостовых сооружений на пульсационные ветровые воздействия, которые сами по себе также возбуждают вынужденные колебания конструкций [14–16].

Значение логарифмического декремента аэродинамического демпфирования при пульсационном воздействии ветра δ_a для мостов может быть приблизительно оценено по формуле⁴:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot v_m(z)}{2 \cdot f_1 \cdot \mu_e} \quad (9)$$

где c_f — коэффициент усилия для моста в направлении действия ветра; ρ — плотность воздуха; $v_m(z)$ — средняя скорость ветрового потока; f_1 — основная собственная частота колебаний конструкций моста; μ_e — эквивалентная масса на единицу поверхности конструкции моста.

В ходе проектирования конкретного моста после окончательной оценки возможных значений декремента его колебаний δ при расчете на пульсационное ветровое воздействие определяется коэффициент динамичности $K_{дин}$ на основании вычисляемого частотного параметра ε_1 для данного моста, который для первой собственной частоты f_1 имеет вид³:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{w_0 \cdot k(z_{жк}) \cdot \gamma_f}}{940 \cdot f_1}, \quad (10)$$

где w_0 — нормативное значение давления ветра; $k(z_{жк})$ — коэффициент изменения давления ветра по высоте; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке.

Далее значение $K_{дин}$ для стальных и железобетонных мостов при ветровом воздействии определяется по двум графическим кривым для стальных и железобетонных конструкций, представленным в действующем нормативном документе. Соответствующая кривая для конструкций из алюминиевых сплавов в настоящее время в данном документе отсутствует, поэтому для определения $K_{дин}$ приходится применять метод интерполяции с использованием значений уже имеющихся кривых¹.

Для снижения значений динамического коэффициента $K_{дин}$ и предотвращения резонансных яв-

лений мосты повышенной ответственности снабжаются виброгасителями колебаний, часть энергии которых δ_d поглощается данными устройствами. Выбор типов, количества и параметров применяемых виброгасителей — задача, решаемая в ходе проектирования моста.

Как видно из представленного выше материала, обоснованное определение значений декремента колебаний δ и динамического коэффициента $K_{дин}$ при проектировании конкретного моста должно осуществляться на основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в ходе натурных испытания существующих мостов из алюминиевых сплавов аналогичного назначения. Для ответственных мостов с пролетом более 60 м значение декремента следует устанавливать при научно-техническом сопровождении проектирования⁷.

В свою очередь, для простых мостовых сооружений с разрезным балочным пролетным строением, включая мосты из алюминиевых сплавов, при частотах вынуждающих воздействий выше значений первой и второй собственных частот допускается не учитывать возникающие при колебаниях силы инерции и воздействие ветровой нагрузки надвигающийся по мосту транспорт³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования динамического характера работы мостовых конструкций из алюминиевых сплавов

Вопросам экспериментально-теоретического определения значений логарифмического декремента строительных сооружений конструкций различного назначения посвящено значительное количество исследований в РФ и за рубежом [17–25], однако для мостов и конструкций другого типа из алюминиевых сплавов число таких исследований крайне ограничено [5].

В 2020 г. в НИУ МГСУ проведены экспериментальные исследования динамических параметров трех пешеходных мостов, выполненных из алюминиевого сплава 1915 Т1, — моста пролетом 40,1 м через Рязанскую ул. в г. Тула (рис. 4) и двух мостов с пролетами 10 м в пойме р. Яуза в г. Москве (рис. 5). Данные мосты имеют несущие конструкции в форме вертикальных боковых ферм с треугольной раскосной решеткой.

Целью исследований стало определение значений:

- основных (первой и второй) собственных частот колебаний несущих конструкций данных мостов;
- логарифмического декремента колебаний для основных частот собственных колебаний в мостах указанного типа.

⁷ СП 443.1325800.2019. Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования.



Рис. 4. Пешеходный мост в г. Тула, пролет 40,1 м

Fig. 4. Pedestrian bridge in Tula, span 40.1 m



Рис. 5. Пешеходные мосты в пойме р. Яуза (г. Москва), пролеты — 10 м, опирание на сваи, погруженные в вязкий береговой грунт

Fig. 5. Pedestrian bridges in the floodplain of the Yauza river (Moscow), spans — 10 m, resting on piles immersed in viscous coastal soil

Свободные колебания мостовых конструкций возбуждались с помощью ударного воздействия вертикально падающего груза в средней части пролетов.

Измерение колебаний исследуемых конструкций выполнялось с помощью переносных трехкомпонентных сейсмометров SMG-6TD, одновременно регистрирующих колебания поверхности объекта, на который они установлены, в трех взаимно перпендикулярных направлениях [26]. Схемы расположения точек установки оборудования на изучаемых объектах представлены на рис. 6, 7.

В ходе испытаний регистрировались скорости колебаний, мм/с, запись которых производилась по трем взаимно перпендикулярным направлениям. На рис. 8 приведена виброграмма скорости колебаний в вертикальном направлении.

Амплитуды колебаний, как и скорости колебаний, имеют аналогичную форму затухающих синусоидальных колебаний, математически подобных по параметрам зарегистрированным виброграммам скоростей, поэтому последние без дополнительных преобразований можно напрямую использовать для определения значений декремента колебаний.

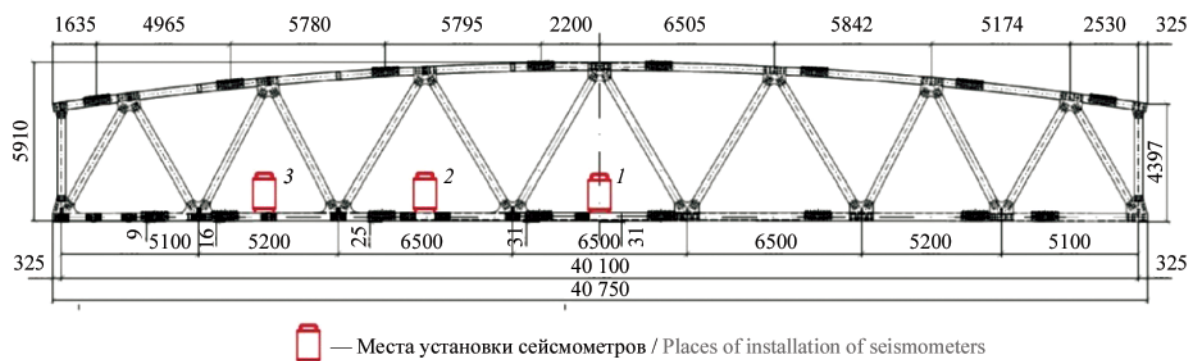


Рис. 6. Схема расположения точек измерения колебаний на конструкциях пешеходного моста через Рязанскую улицу в г. Тула

Fig. 6. The layout of the vibration measurement points on the structures of the pedestrian bridge across Ryazanskaya street in Tula

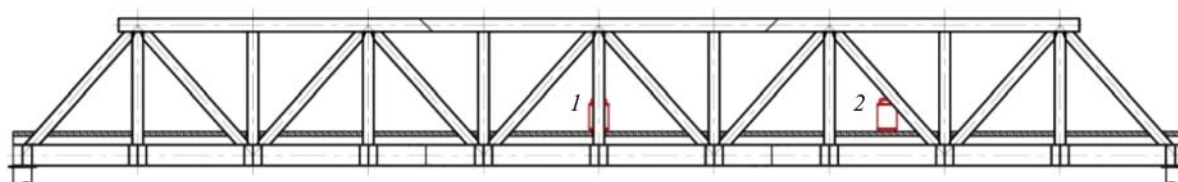


Рис. 7. Схема расположения точек измерения колебаний на конструкциях мостов на р. Яуза в г. Москве

Fig. 7. Arrangement of vibration measurement points on bridge structures on the Yauza river in Moscow

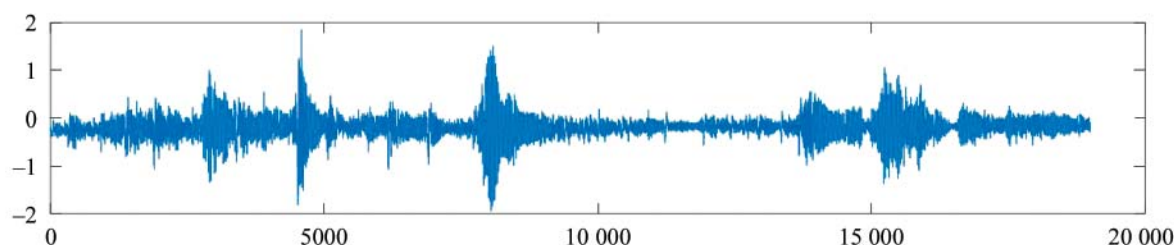


Рис. 8. Фрагмент записи скорости колебаний в вертикальном направлении

Fig. 8. Fragment of the recording of the vibration velocity in the vertical direction

Зарегистрированные виброграммы скоростей подвергались математической обработке в специальном программном обеспечении GNU Octave, которое выделяет из фрагмента записи колебаний затухающие синусоиды колебаний по основным частотам. При этом с помощью полосового фильтра записи выглаживаются до классической формы затухающих синусоид (рис. 9), по которым при их дальнейшей обработке в соответствии с выражениями (3), (4) определяются значения декрементов колебаний по основным частотам.

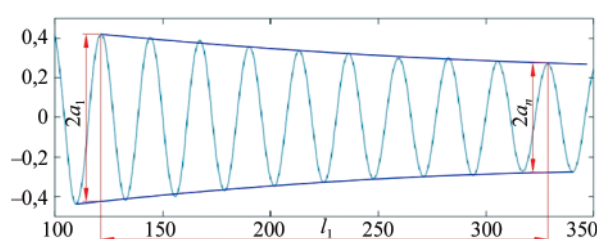


Рис. 9. Пример обработки виброграммы для определения значения декремента

Fig. 9. Example of vibration diagram processing to determine the decrement value

Табл. 2. Средние значения частот и декрементов колебаний исследованных мостов

Table 2. Average values of frequencies and vibration decrements of the studied bridges

Конструкция Construction	Первая (основная) частота, Гц 1-st (main) frequency, Hz	Декремент по первой частоте Decrement by 1-st frequency	Вторая частота, Гц 2-st frequency, Hz	Декремент по второй частоте Decrement by 2-st frequency
Пешеходный мост в г. Тула, пролет 40,1 м Pedestrian bridge in Tula, span 40.1 m	1,91	0,077	4,36	0,045
Пешеходный мост в пойме р. Яуза, г. Москва, пролет 10 м Pedestrian bridge in the floodplain of the Yauza river, Moscow, span 10 m	7,02	0,126	21,6	0,045

Результаты динамических испытаний мостов из алюминиевых сплавов

В результате обработки полученных в ходе испытаний мостов из алюминиевого сплава 1915 Т1 экспериментальных данных определили следующие значения первой и второй частот собственных колебаний и соответствующие им значения декрементов, представленные в табл. 2.

Из представленных результатов испытаний можно заключить следующее:

- с ростом длины пролета с 10 до 40,1 м значения собственных частот снижаются, для первой частоты — в 3,67 раза, для второй частоты — в 4,95 раза;
- для моста с меньшим пролетом 10 м значение декремента по первой частоте 0,126 существенно выше, чем для моста с пролетом 40,1 м, что можно объяснить более заметным влиянием на значение декремента условий опирания моста с меньшим пролетом (на сваи в вязком грунте);
- значения декремента колебаний для второй частоты собственных колебаний для обоих мостов существенно меньше, чем для первой частоты: для моста в г. Тула — в 1,71 раза (71 %), для моста в г. Москва — в 2,8 раза (180 %);
- значение декремента по второй частоте зависит в основном от материала конструкции и конструктивного решения несущих конструкций, которое для обоих мостов в целом одинаково — боковые плоские вертикальные фермы с треугольной решеткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Декремент колебаний δ является основным параметром для вычисления коэффициента динамичности $K_{дин}$, который определяет уровень параметров НДС при динамическом нагружении мостовых сооружений. Уменьшение его значений ведет к росту $K_{дин}$, что приводит к повышению расхода

материалов для обеспечения нормативных условий эксплуатации мостового сооружения.

При проектировании большинства мостовых сооружений из всех видов материалов, включая алюминиевые сплавы, как правило, обязательно учитывается первая частота и соответствующее ей значение декремента. Для более сложных и ответственных сооружений необходимо учитывать вторую частоту и соответствующее ей значение декремента.

Значения декремента колебаний для каждой собственной частоты различно, с увеличением частоты значение соответствующего ей декремента заметно снижается, для мостов из алюминиевых сплавов снижение декремента для первой и второй частот может находиться в пределах 70–180 % (табл. 2).

При проектировании мостовых сооружений из алюминиевых сплавов значения декремента колебаний для конкретного сооружения определяются на основании анализа его конструктивной схемы, действующих нагрузок, состава и свойств материалов, типов соединений, условий опирания и взаимодействия с окружающей средой с учетом установленных данных для мостов аналогичного типа и назначения (табл. 1).

При проектировании сложных и ответственных мостовых сооружений с использованием современных высокопрочных алюминиевых сплавов значения декремента следует устанавливать в ходе научно-технического сопровождения, включая экспериментальные исследования планируемых к применению алюминиевых сплавов, с учетом того, что для них значения декремента в целом ниже, чем для распространенных менее прочных марок алюминиевых сплавов.

Полученные результаты проводимых экспериментальных исследований и научно-технического сопровождения необходимо включать в обновленные версии нормативных документов РФ по проектированию мостов из алюминиевых сплавов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трищенко В.И. Алюминиевые мосты: спрос отстает от предложения // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 5 (72). С. 73–78.
2. Бородин В.В., Рыжкова О.В., Улас Ю.В. Перспективы развития алюминиевого производства в России // Фундаментальные исследования. 2018. № 12–1. С. 72–77.
3. Могилюк Ж.Г., Подувальцев В.В. Нормативные проблемы расчета динамических параметров зданий и сооружений // Компетентность. 2020. № 9–10. С. 22–30. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10903
4. Хазов П.А., Кожанов Д.А., Анущенко А.М., Сатанов А.А. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс. Н. Новгород : ННГАСУ, 2022. 97 с.
5. Коргин А.В., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З. Определение динамических характеристик конструкций из алюминиевых сплавов // Известия вузов. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 61–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-61-70
6. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций: аналитические методы расчета, основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям. М. : Изд-во АСВ, 2006. 288 с.
7. Тарасов В.А., Барановский М.Ю., Дуванова И.А., Сальманов И.Д., Павлушкина Ю.Е. Колебания стержневой системы с одной степенью свободы // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 10 (37). С. 53–80.
8. Картопольцев А.В., Картопольцев В.М., Кухаренко С.А. К вопросу развития методов регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 201–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-201-219
9. Глушак Б.Л., Игнатова О.Н., Пушков В.А., Новиков С.А., Гирин А.С., Сеницын В.А. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг-6 при нормальной и повышенной температурах // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 6 (244). С. 139–143.
10. Gloushenkov V., Novobratsky R., Bourmistrov A. Influence of the spread in values of aluminium alloy dynamic properties upon the results of magnetic-pulse strain // DYMAT 1991 — 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. 1991. Pp. C3-331–C3-334. DOI: 10.1051/jp4:1991347
11. Томилин А.К., Кузнецов Ф.Ю., Коноваленко И.С., Дружинин Н.В., Красновейкин В.А., Смолин И.Ю. О частотной зависимости внутреннего трения сплава АМг-6 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 71–79. DOI: 10.31857/S0235711921030159
12. Павлов Е.И. Методика экспериментальной оценки динамических характеристик пролетных строений автодорожных мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 23 с.
13. Кондратов В.В., Петров В.А., Ковалинский С.С. Расчетно-экспериментальные исследования динамического взаимодействия пролетного строения и опор железнодорожного моста // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13. № 3 (48). С. 344–352.
14. Агеев А.В. Аэроупругость пролетных строений мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 20 с.
15. Ведяков И.И., Востров В.К. Особые ветровые воздействия и актуализация нормативных документов в строительстве // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 5 (280). С. 38–46.
16. Poddaeva O., Churin P. Aerodynamic stability of bridges with various levels of structural damping // Architecture and Engineering. 2021. Vol. 6. Issue 4. Pp. 54–62. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-4-54-62
17. Мондрус В.Л., Каракозова А.И. К вопросу об определении логарифмических декрементов колебаний высотных металлических сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 2 (241). С. 45–47.
18. Остроумов Б.В., Каракозова А.И. Способ вычисления фактических логарифмических декрементов колебаний высотных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 40–41.
19. Дорофеев В.М., Булыкин И.И., Назьмов Н.В. Методика определения периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 4. С. 28–29.
20. Данилов А.В., Тумаков С.А. Исследование влияния собственных колебаний на напряженно-деформированное состояние высотного сооружения // Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов высших учебных заведений с международным участием : сб. мат. конф. в 3-х частях. Часть 2. Ярославль, 2019. С. 868–871.
21. Shishkin V.M., Levashov A.P. Modeling of damped plate vibrations taking into account amplitude-dependent energy dissipation in the material // Advanced Science. 2017. Vol. 3. Pp. 367–376.
22. Brunetti M., Ciambella J., Evangelista L., Lofrano E., Paolone A., Vittozzi A. Experimental results in damping evaluation of a high-speed railway bridge //

Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 3015–3020. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.402

23. Brownjohn J.M.W. Estimation of damping in suspension bridges // ICE Proceedings Structures and Buildings. 1994. Vol. 104. Issue 4. Pp. 401–415. DOI: 10.1680/istbu.1994.27199

24. Gattulli V., Lofrano E., Paolone A., Potenza F. Measured properties of structural damping in railway bridges // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2019. Vol. 9. Issue 11. Pp. 639–653. DOI: 10.1007/s13349-019-00358-3

25. Gimazetdinov A., Kayumov R., Shmelev G., Khaidarov L., Antonov A.B. Experimental determi-

nation of dynamic characteristics and analysis of acceleration of vibrations of pedestrian bridges // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. Issue 1. P. 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012058

26. Петров С.А., Захарченко Л.С. Инструменты для сейсмологических наблюдений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России : тр. Пятой науч.-техн. конф. : к 100-летию организации инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Обнинск, 2015. С. 238–241.

Поступила в редакцию 22 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Андрей Валентинович Коргин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры испытаний сооружений, заведующий научно-исследовательской лабораторией инженерных исследований и мониторинга строительных конструкций (НИЛ ИИМСК); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 350779, ResearcherID: B-4206-2016, ORCID: 0000-0002-5865-2891; Korguine@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Trishchenko V.I. Aluminium bridges: demand is behind the supply. *Transport of the Russian Federation*. 2017; 5(72):73-78. (rus.).

2. Borodkina V.V., Ryzhkova O.V., Ulas Yu.V. Prospects for the development of aluminum production in Russia. *Fundamental Research*. 2018; 12-1: 72-77. (rus.).

3. Mogilyuk Zh.G., Poduval'tsev V.V. Normative problems of calculating dynamic parameters of buildings and structures. *Competency*. 2020; 9-10:22-30. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10903 (rus.).

4. Khazov P.A., Kozhanov D.A., Anushchenko A.M., Satanov A.A. *Dynamics of building structures under extreme natural influences: vibrations, strength, resource*. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2022; 97. (rus.).

5. Korgin A.V., Ermakov V.A., Zeyd Kilani L.Z. Determination of the structural dynamic parameters of the aluminium alloy bridges. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 2:61-70. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-61-70 (rus.).

6. Chernov Yu.T. *Vibrations of building structures, analytical methods of calculation, fundamentals of design and normalization of vibrations of building structures exposed to dynamic influences*. Moscow, ASV, 2006; 288. (rus.).

7. Tarasov V.A., Baranovskiy M.Yu., Duvanova I.A., Salmanov I.D., Pavluskina Yu.Ye. Single degree of freedom frame structure movements. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 10(37):53-80. (rus.).

8. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kukharenko S.A. Towards dynamic property control of bridge spans. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(6):201-219. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-201-219 (rus.).

9. Glushak B.L., Ignatova O.N., Pushkov V.A., Novikov S.A., Girin A.S., Sinitsyn V.A. Dynamic deformation of aluminum alloy AMg-6 at normal and elevated temperatures. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000; 41(6):139-143. (rus.).

10. Gloushenkov V., Novobratsky R., Bourmistrov A. Influence of the spread in values of aluminium alloy dynamic properties upon the results of magnetic-pulse strain. *DYMAT 1991 — 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*. 1991; C3-331-C3-334. DOI: 10.1051/jp4:1991347

11. Tomilin A.K., Kuznetsov F.Y., Konovlenko I.S., Druzhinin N.V., Krasnovеikin V.A., Smolin I.Y. Frequency dependence of the internal friction of the amg6 alloy. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021; 3:71-79. DOI: 10.31857/S0235711921030159 (rus.).

12. Pavlov E.I. *Methodology of experimental evaluation of dynamic characteristics of span structures of road bridges : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2006; 23. (rus.).

13. Kondratov V.V., Petrov V.A., Kovalinsky S.S. Computational and experimental studies of the dynamic interaction of a span structure and railway bridge sup-

ports. *News of the St. Petersburg University of Railway Transport*. 2016; 13(3):344-352. (rus.).

14. Ageev A.V. *Aeroelasticity of bridge spans : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2007; 20. (rus.).

15. Vedyakov I.I., Vostrov V.K. Special wind impacts and updating of regulatory documents in construction. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2018; 5(280):38-46. (rus.).

16. Poddaeva O., Churin P. Aerodynamic stability of bridges with various levels of structural damping. *Architecture and Engineering*. 2021; 6(4):54-62. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-4-54-62

17. Mondrus V.L., Karakozova A.I. On the determination of logarithmic decrements of vibrations of high-rise metal structures. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2012; 2:45-47. (rus.).

18. Ostroumov B.V., Karakozova A.I. Method of calculating the actual logarithmic decrements of fluctuations of high-rise structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2011; 6:40-41. (rus.).

19. Dorofeev V.M., Bulykin I.I., Nazjmov N.V. Methods of determining the period and logarithmic decrement of the basic tone of natural vibrations of buildings and structures based on natural and technogenic dynamic effects. *Industrial and Civil Engineering*. 2006; 4:28-29. (rus.).

20. Danilov A.V., Tumakov S.A. Investigation of the effect of natural oscillations on the stress-strain state of a high-rise structure. *Seventy-second All-Russian Scientific and technical conference of students, undergraduates, postgraduates of higher educational institutions with international participation : collection*

of conference materials. In 3 parts. Part 2. Yaroslavl, 2019; 868-871. (rus.).

21. Shishkin V.M., Levashov A.P. Modeling of damped plate vibrations taking into account amplitude-dependent energy dissipation in the material. *Advanced Science*. 2017; 3:367-376. (rus.).

22. Brunetti M., Ciambella J., Evangelista L., Lofrano E., Paolone A., Vittozzi A. Experimental results in damping evaluation of a high-speed railway bridge. *Procedia Engineering*. 2017; 199:3015-3020. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.402

23. Brownjohn J.M.W. Estimation of damping in suspension bridges. *ICE Proceedings Structures and Buildings*. 1994; 104(4):401-415. DOI: 10.1680/istbu.1994.27199

24. Gattulli V., Lofrano E., Paolone A., Potenza F. Measured properties of structural damping in railway bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019; 9(11):639-653. DOI: 10.1007/s13349-019-00358-3

25. Gimazetdinov A., Kayumov R., Shmelev G., Khaidarov L., Antonov A.B. Experimental determination of dynamic characteristics and analysis of acceleration of vibrations of pedestrian bridges. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 890(1):012058. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012058

26. Petrov S.A., Zakharchenko L.S. Instruments for seismological observations. *Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East : proceedings of the Fifth Scientific and Technical Conference: to the 100th anniversary of the organization of instrumental seismological observations in Kamchatka*. Obninsk, 2015; 238-241. (rus.).

Received February 22, 2023.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

BIONOTES: **Andrey V. Korgin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Testing Structures, Head of the Research Laboratory of Engineering Research and Monitoring of Building Structures (RLERMB); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 350779, ResearcherID: B-4206-2016, ORCID: 0000-0002-5865-2891; korguine@mgsu.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.064:504.53

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.584-594

Экологический мониторинг территорий условно чистых зон Волгоградской агломерации

Ирина Юрьевна Глинянова¹, Владимир Трофимович Ерофеев²,
Виктор Васильевич Афонин²

¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия;

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
(МГУ им. Н.П. Огарёва); г. Саранск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Территории условно чистых зон (УЧЗ) выделяются под развитие коллективных садов и дач, формирующихся вдали от промышленных центров в экологически чистых, живописных местах для полноценного отдыха граждан. Цель исследования — оценка экологического состояния территорий садоводческих некоммерческих товариществ (СНТ) «Орошенец», «Шельф» (г. Волгоград) в сравнительной характеристике с жилой зоной рп. Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области), подверженной влиянию промышленных производств, с использованием аэрозольных показателей.

Материалы и методы. Материалом исследования явились аэрозольные суспензии, приготовленные из частиц, отобранных с листьев *Prunus armeniaca* L. в соответствии с международными методиками (А. Lukowski, R. Porek и др., 2020), и изученные по показателям кислотности, удельной электропроводности на электрохимическом оборудовании серии «МУЛЬТЕСТ» (Россия); токсиканты выявлялись на основании развития тест-объектов (патент РФ № 2746764); анализ дисперсного состава аэрозолей, их количество и массовая доля осуществлялись по ГОСТ Р 56929–2016. Прогнозирование источников природного загрязнения на территории СНТ проводилось методом дистанционного зондирования Земли.

Результаты. Интегральная оценка экологического состояния территории УЧЗ в течение 2018–2020 гг. демонстрировала 1 балл ($Q_{\text{СНТ}} = 0,699–0,725$). В атмосферном воздухе устойчиво регистрировались минерализованные аэрозоли ($EC = 38,11–42,68$ (мкСм/см)), количество PM_{10} достигало 70 %, при этом отсутствовали кислые примеси и токсиканты.

Выводы. Экологический статус территории СНТ оценивался как «экологическая норма», но «со слабыми изменениями флоры и фауны», что свидетельствовало о слабом загрязнении территории из возможных природных источников в виде активных геологических структур (установлены проекции очагов поверхностных температурных аномалий, подтвержденные данными новейших спутниковых систем (Landsat-8, США) и натурными исследованиями «горячих точек»).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрозоли, кислотность (pH), удельная электропроводность (ЕС, мкСм/см), токсичность, мелкодисперсная пыль (PM_{10}), количество и массовая доля частиц, Landsat-8, природное загрязнение, функциональные зоны, генеральный план, экологическая оценка территорий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глинянова И.Ю., Ерофеев В.Т., Афонин В.В. Экологический мониторинг территорий условно чистых зон Волгоградской агломерации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 584–594. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.584-594

Автор, ответственный за переписку: Ирина Юрьевна Глинянова, ecoris@yandex.ru.

Ecological monitoring of conditionally clean areas in Volgograd agglomeration

Irina Yu. Glinyanova¹, Vladimir T. Erofeev², Viktor V. Afonin²

¹ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;

² N.P. Ogarev National Research Mordovian State University; Saransk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The territories of conditionally clean zones are allocated for the development of collective gardens and summer cottages, being formed far from industrial centers in ecologically clean, picturesque places for healthy recreation of citizens. The purpose of the study is to assess the environmental condition of the territories of horticultural non-commercial partnerships (HNP) "Oroshenets", "Shelf" (Volgograd) in a comparative analysis with the residential area of Srednyaya Akhtubia work settlement (Sredneakhtubinsky district of the Volgograd region), affected by industrial production using aerosol indicators.

Materials and methods. The material of the study was aerosol suspensions prepared from particles, collected from the leaves of *Prunus armeniaca* L. in accordance with international methods (A. Lukowski, R. Popek et al., 2020) and studied in terms of acidity, electrical conductivity on electrochemical equipment of the "MULTEST" series (Russia); toxicants were identified based on the development of test objects (RF patent No. 2746764); analysis of the disperse composition of aerosols, their amount and mass fraction were carried out according to GOST R 56929–2016. Prediction of sources of natural pollution on the territory of HNP was carried out by the method of remote sensing of the Earth.

Results. The Integral assessment of the ecological condition of the territory of the conditionally clean zone during 2018–2020 demonstrated 1 point ($Q_{SNT} = 0.699–0.725$). Mineralized aerosols ($EC = 38.11–42.68$ ($\mu S/cm$)) were steadily recorded in the atmospheric air, the amount of PM_{10} reached 70 %, while there were no acid impurities and toxicants.

Conclusions. The ecological status of the HNP area was evaluated as an "ecological norm", but "with slight changes in flora and fauna", which indicated a slight pollution of the territory from possible natural sources in the form of active geological structures (projections of foci of surface temperature anomalies, confirmed by the data of the latest satellite systems (Landsat-8, USA) and field studies of "hot spots").

KEYWORDS: aerosols, acidity (pH), electrical conductivity (EC, $\mu S/cm$), toxicity, fine dust (PM_{10}), number and mass fraction of particles, Landsat-8, natural pollution, functional zones, master plan, environmental assessment of areas

FOR CITATION: Glinyanova I.Yu., Erofeev V.T., Afonin V.V. Ecological monitoring of conditionally clean areas in Volgograd agglomeration. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):584-594. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.584-594 (rus.).

Corresponding author: Irina Yu. Glinyanova, ecoris@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование функциональных зон в генеральных планах населенных пунктов регламентируется нормативно-законодательной базой РФ с обоснованием экономически эффективного и экологически безопасного их использования [1]. Большое внимание обращается на то, чтобы генеральные планы населенных пунктов гарантировали бы жителям соблюдение их прав на комфортную, экологически безопасную среду обитания [2]. В этой связи известно применение экологических подходов к проектированию устойчивой городской среды [3], в том числе рассмотрение вопросов геоэкологического районирования территорий при решении задач градостроительного планирования [4]; освоение методик выявления, оценки и визуализации комплекса геоэкологических ограничений при разработке генеральных планов населенных пунктов, реорганизации и освоении новых территорий [5].

При этом некоторыми исследователями функциональные зоны рассматриваются как своеобразный функциональный каркас городской агломерации, который отражает в целом ее современную функциональную нагрузку [6].

Особое место отводится функциональным зонам развития коллективных садов и дач, формирующихся за городом, вблизи рек, ериков, озер, лесов и др., т.е. вдали от промышленных зон и индустриальных центров в живописных местах для полноценного отдыха граждан. Многие авторы позиционируют «сады» как значительный резерв современного доступного и комфортного малоэтажного жилья, недооцениваемый в практике отечественного градостроительства [7], что имеет важное значение для проживания граждан в экологически чистой, благоприятной окружающей среде.

Актуальность темы исследования заключается в том, что не всегда условно чистые территории, функционирующие в условиях отсутствия какой-

либо антропогенной нагрузки, могут подтверждать статус «условно чистых зон» (УЧЗ), поскольку есть риски расположения земельных участков в основании активности скрытых геологических структур с дегазацией ими в окружающую среду загрязняющих веществ, что может неблагоприятно сказываться на здоровье населения [8].

Существующая система экологического мониторинга, например в Волгоградской области, не позволяет в должной мере выявлять природное загрязнение территорий. В связи с чем региональная система мониторинга требует совершенствования, внедрения новых подходов к оценке экологического состояния территорий, разработке инновационных решений в области экологического мониторинга с целью оперативной диагностики экологической ситуации территорий и выявления источников загрязнения, что является актуальной темой исследования по обеспечению экологической безопасности населения.

Авторами предлагается новый метод оценки экологического статуса территорий с апробацией его на земельных участках садоводческих товариществ Волгоградской агломерации с использованием аэрозольных показателей. Цель исследования — оценка экологического состояния земельных участков садоводческих некоммерческих товариществ (СНТ) «Орошенец», «Шельф» (г. Волгоград) в сравнительной характеристике с жилой зоной рп. Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области), подверженной влиянию промышленных производств, на основании аэрозольных показателей с использованием интегральной оценки экологического состояния территорий в виде свертки нормированных базовых факторов (средних значений аэрозольных показателей), соответствующих функциям, характеризующих экологические аспекты изучаемой местности.

Научная гипотеза заключается в обосновании возможности оценки экологического состояния земельных участков садоводческих товариществ посредством исследования комплекса аэрозольных показателей, в том числе в сравнительной характеристике аэрозольных показателей, полученных с территории, функционирующей в условиях антропогенной нагрузки и в УЧЗ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования явились аэрозольные частицы, которые отбирались с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca* L.) в СНТ «Орошенец», «Шельф» и жилой зоны рп. Средняя Ахтуба за весенне-летний период 2018–2020 гг. Отбор аэрозольных частиц и приготовление аэрозольных суспензий осуществлялись на основе международных методик [9]. Изучение показателя кислотности (рН) и удельной электропроводности (ЕС, мкСм/см) происходило на электрохимическом оборудовании серии «МУЛЬТЕСТ» (Россия); исследование токсичности аэрозольных суспензий базировалось на измерении развития тест-объектов (*Lr*, см) [10]; дисперсный состав аэрозольных частиц, их количество и массовая доля осуществлялись по ГОСТ Р 56929–2016.

Оценка экологического статуса территорий выполнялась с использованием вычислений интегральной оценки в виде свертки нормированных базовых факторов (средних значений аэрозольных показателей), соответствующих функциям, характеризующих экологические аспекты [11]. Статистический анализ полученных данных внутри выборок осуществлялся с помощью непараметрического критерия Краскела – Уоллиса, а между выборками применялся Т-критерий Вилкоксона.

Исследование природного загрязнения территории базировалось на данных новейших спутниковых систем (Landsat-8, США): (Landsat8:LC8[172_26]

(2021-08-29_007-54) LST_B10)): температура поверхности земли от +19,3967743 до +42,5894241 °С. Территорией исследования была выбрана функциональная зона в Волгоградской агломерации, предназначенная для развития коллективных садов и дач (СНТ «Орошенец», «Шельф» (Советский район, г. Волгоград)), с отсутствием в радиусе 20 км какой-либо антропогенной нагрузки (условно чистая зона) и жилая зона рп. Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области) с известной нагрузкой предприятий строительного комплекса (контрольная).

Условно чистая зона — СНТ «Орошенец», «Шельф» располагаются в Советском районе г. Волгограда на берегу Варваровского водохранилища. Выбор данной территории был обусловлен тем, что в радиусе более 20 км отсутствует городское хозяйство и нет какой-либо локальной антропогенной нагрузки, что обуславливает статус территории как УЧЗ. Селитебная зона рп. Средняя Ахтуба расположена на берегу р. Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области), функционирует в условиях антропогенной нагрузки предприятий строительной индустрии (2 керамзитовых производства).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований получены следующие данные. В табл. 1 приведены значения результатов вычислений интегральной оценки экологического состояния территории $Q_{\text{СНТ}}$ СНТ «Орошенец», «Шельф».

Поскольку УЧЗ был присвоен 1 балл, а не ноль, была проведена сравнительная характеристика значений каждого показателя из УЧЗ и жилой зоны рп. Средняя Ахтуба с известной нагрузкой предприятий промышленного комплекса для установления возможного показателя, который бы мог явиться индикатором на загрязнение территории.

Табл. 1. Результаты вычислений интегральной оценки экологического состояния территорий СНТ «Орошенец», «Шельф» (Советский район, г. Волгоград)

Table 1. The results of calculations of the integral assessment of the ecological condition of the territories of HNP «Oroshenets», «Shelf» (Sovetsky district, Volgograd)

Территории исследования Study area	Годы Years	Интегральная оценка экологического состояния территории $Q_{\text{СНТ}}$ Integral assessment of the ecological state of the territory Q_{SNT}	Баллы Points	Возможные изменения флоры и фауны Possible changes flora and fauna	Экологический статус территорий Ecological status of territories
Условно чистая зона (СНТ «Орошенец», «Шельф») Conditionally clean zone (HNP «Oroshenets», «Shelf»)	2018	0,725	1	Слабые Weak	Экологическая норма Ecological norm
	2019	0,699	1		
	2020	0,702	1		

Табл. 2. Результаты вычислений интегральной оценки экологического состояния территории жилой зоны рп. Средняя Ахтуба**Table 2.** The results of calculations of the integral assessment of the ecological state of the territory of the residential area of the Srednyaya Akhtuba settlement

Территории исследования Study area	Годы Years	Интегральная оценка экологического состояния территории $Q_{\text{Ср.Ах.}}$ Integral assessment of the ecological state of the territory $Q_{\text{Sr.Aht}}$	Баллы Points	Возможные изменения флоры и фауны Possible changes flora and fauna	Экологический статус территорий Ecological status of territories
Жилая зона рп. Средняя Ахтуба The residential area of the Srednyaya Akhtuba work settlement	2018	0,5	3	Угнетение роста и гибель Growth inhibition and death	Зона риска Risk area
	2019	0,5	3		
	2020	0,4	3		

В табл. 2 приведены данные результатов вычислений интегральной оценки экологического состояния территории $Q_{\text{Ср.Ах.}}$ жилой зоны рп. Средняя Ахтуба.

Сравнительная характеристика средних значений показателей аэрозольных суспензий с территорий УЧЗ и контрольной зоны (КЗ) (жилой зоны, расположенной в условиях известной антропогенной нагрузки предприятий стройиндустрии) отражена в табл. 3.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ гипотеза об однородности внутри выборок в 2018, 2019, 2020 гг., полученных с территории жилой зоны рп. Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район, Волгоградская область) и УЧЗ (СНТ «Орошенец», «Шельф»), была признана значимой по каждому исследуемому аэрозольному показателю на основании применения непараметрического критерия Краскела – Уоллиса [12].

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ нулевая гипотеза об однородности анализируемых выборок между территориями жилой зоны рп. Средняя Ахтуба и УЧЗ отвергалась и принималась конкурирующая гипотеза о неоднородности анализируемых выборок ($F(X) \neq G(X)$) в результате использования Т-критерия Вилкоксона.

Сравнение значений аэрозольных показателей из жилой зоны рп. Средняя Ахтуба и УЧЗ в течение 2018–2020 гг. позволило выявить между ними статистические значимые различия, что свидетельствовало в пользу действия не случайного, а системного фактора на обеих территориях.

При этом, исходя из табл. 3, аэрозольный показатель кислотности pH в УЧЗ был близок к нормативным значениям атмосферных осадков [13], атмосферный воздух жилой зоны рп. Средняя Ахтуба, наоборот, характеризовался кислыми атмосферными примесями (pH = 4,89–5,33).

Исследование аэрозольного показателя удельной электропроводности (ЕС, мкСм/см) на обеих территориях показало высокие его значения в жилой зоне рп. Средняя Ахтуба, достигающие до ЕС = 106,34 мкСм/см, что в 2,5 раз выше, чем в условно чистой зоне.

При этом была также выявлена закономерность, когда с ростом удельной электропроводности (ЕС, мкСм/см): 57,95 (2018 г.); 100,36 (2019 г.); 106,34 (2020 г.) наблюдались одновременно низкие значения показателя кислотности pH аэрозольных суспензий: 4,89 (2018 г.); 5,28 (2019 г.); 5,33 (2020 г.), устойчиво диагностируемые в течение 2018–2020 гг. на контрольном участке — в рп. Средняя Ахтуба.

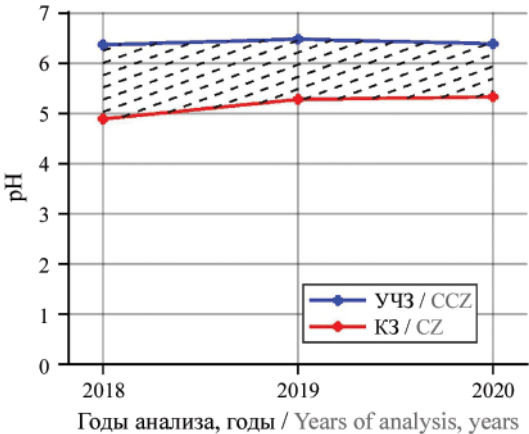
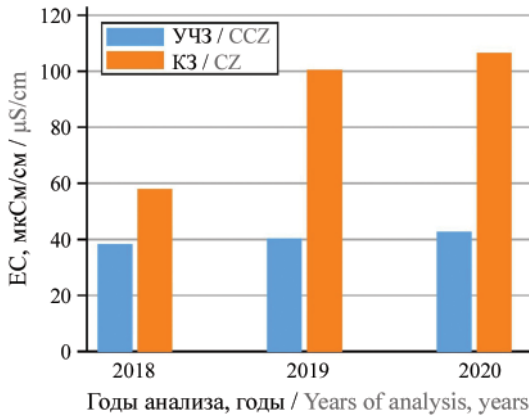
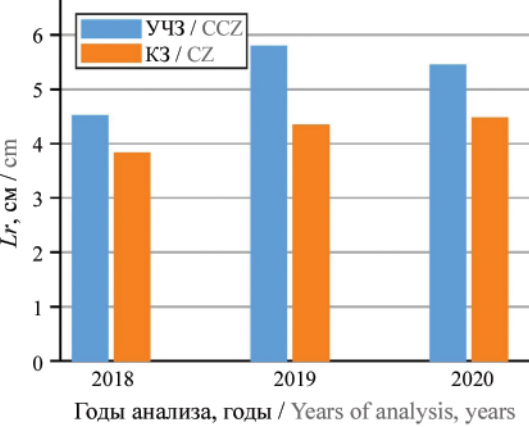
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (1)$$

Для проверки предположения о наличии зависимости между показателями кислотности pH и удельной электропроводности (ЕС, мкСм/см) использовался коэффициент корреляции (1).

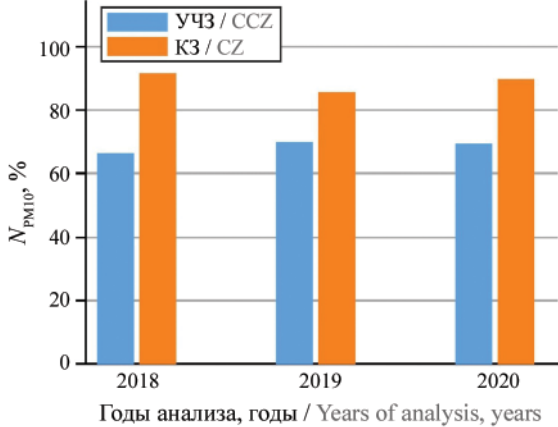
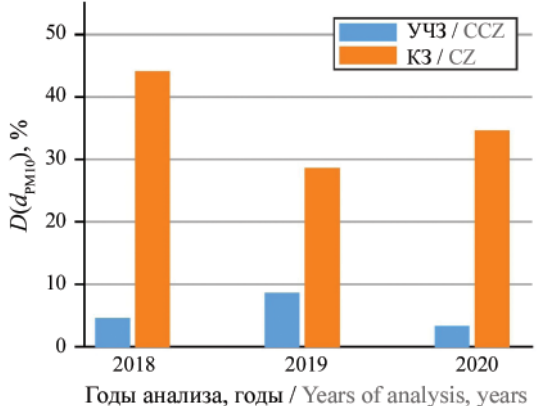
Коэффициент корреляции изменяется в пределах от -1 до $+1$. Величина r означает, увеличивается ли одна переменная по мере того, как увеличивается другая (положительный r), или уменьшается ли одна переменная по мере того, как увеличивается другая (отрицательный r). Величина r указывает, как близко расположены точки к прямой линии. В частности, если $r = +1$ или $r = -1$, то имеется абсолютная (функциональная) корреляция по всем точкам, лежащим на линии (практически это маловероятно); если $r \approx 0$, то линейной корреляции нет (хотя может быть нелинейное соотношение). Чем ближе r к крайним точкам ± 1 , тем больше степень линейной связи.

Табл. 3. Сравнительная характеристика средних значений аэрозольных показателей

Table 3. Comparative characteristics of the average values of aerosol indicators

Аэрозольные показатели Aerosol indicators	Годы Years	Средние значения аэрозольных показателей Average values of aerosol indicators		Графики сравнения средних значений аэрозольных показателей УЧЗ и КЗ Graphs of comparison of average values of aerosol indicators of conditionally clean zone and control
		СНТ «Орошенец», «Шельф» (УЧЗ) SNT "Oroshenets", "Shelf" (conditionally clean zone)	Жилая зона рп. Средняя Ахтуба (КЗ) Residential area rp Srednyaya Akhtuba (control zone)	
рН	2018	$6,37 \pm 0,03$	$4,89 \pm 0,06$	 Годы анализа, годы / Years of analysis, years
	2019	$6,48 \pm 0,01$	$5,28 \pm 0,01$	
	2020	$6,39 \pm 0,02$	$5,33 \pm 0,15$	
ЕС, мкСм/см $\mu\text{S/cm}$	2018	$38,11 \pm 0,03$	$57,95 \pm 1,97$	 Годы анализа, годы / Years of analysis, years
	2019	$40,14 \pm 0,09$	$100,36 \pm 0,94$	
	2020	$42,68 \pm 0,13$	$106,34 \pm 0,29$	
Lr, см / cm	2018	$4,52 \pm 0,07$	$3,83 \pm 0,07$	 Годы анализа, годы / Years of analysis, years
	2019	$5,79 \pm 0,02$	$4,34 \pm 0,04$	
	2020	$5,44 \pm 0,03$	$4,47 \pm 0,1$	

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

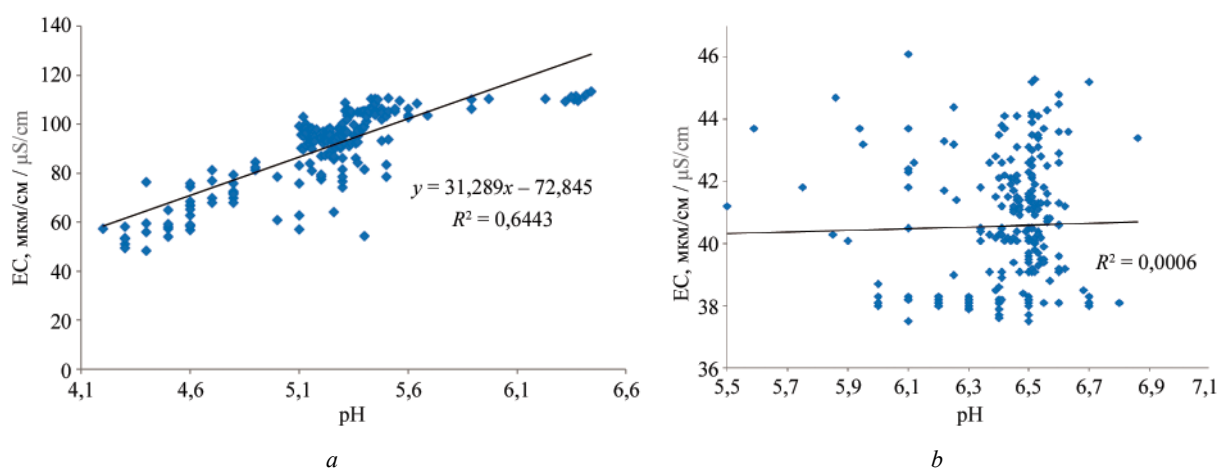
Аэрозольные показатели Aerosol indicators	Годы Years	Средние значения аэрозольных показателей Average values of aerosol indicators		Графики сравнения средних значений аэрозольных показателей УЧЗ и КЗ Graphs of comparison of average values of aerosol indicators of conditionally clean zone and control
		СНТ «Орошенец», «Шельф» (УЧЗ) SNT "Oroshenets", "Shelf" (conditionally clean zone)	Жилая зона рп. Средняя Ахтуба (КЗ) Residential area rp Srednyaya Akhtuba (control zone)	
$N_{PM10}, \%$	2018	$66,14 \pm 1,99$	$91,55 \pm 1,61$	
	2019	$69,80 \pm 1,31$	$85,55 \pm 1,52$	
	2020	$69,22 \pm 1,44$	$89,66 \pm 0,98$	
$D(d_{PM10}), \%$	2018	$4,48 \pm 0,46$	$44,10 \pm 3,72$	
	2019	$8,55 \pm 1,3$	$28,54 \pm 1,76$	
	2020	$3,21 \pm 0,41$	$34,56 \pm 2,04$	

Входными данными для расчета зависимостей между показателями кислотности и удельной электропроводности послужили средние значения показателей кислотности и удельной электропроводности, полученные в 2018–2020 гг. на территории жилой зоны (рп. Средняя Ахтуба) и УЧЗ (СНТ «Орошенец», «Шельф»). Данные средних значений за указанные годы были ранее опубликованы [14] соавтором данной работы.

Корреляционно-регрессионный анализ показал максимальную тесноту связи между удельной электропроводностью и кислотностью на территории ее жилой зоны ($\text{slope} = 31,289$; $r = 0,802$; $P\text{-value} = 0,0216$) и отсутствие подобных связей в УЧЗ ($r = 0,0244$; $P\text{-value} = 0,668$) (рис.).

Уравнение регрессии на рисунке а демонстрирует корреляционные связи между показателями кислотности и удельной электропроводности в жилой зоне рп. Средняя Ахтуба и отсутствие подобных связей в УЧЗ (рис. б), что позволило установить закономерность: с увеличением удельной электропроводности наблюдалось снижение кислотности аэрозолей, отобранных в жилой зоне рп. Средняя Ахтуба. Данный факт свидетельствует о загрязнении жилой зоны рп. Средняя Ахтуба кислотными, минерализованными примесями в течение трех лет (2018–2020 гг.) и не обнаружением их в СНТ «Орошенец», «Шельф».

Сравнительная характеристика значений аэрозольного показателя развития тест-объектов (Lr , см) или токсичности атмосферного воздуха



Графики корреляционных связей между аэрозольными показателями pH и ЕС (мкСм/см) из жилой зоны рп. Средняя Ахтуба (а) и УЧЗ (b), (2018–2020 гг.) [14]

Graphs of correlation of pH and EC (μS/cm) of aerosol suspensions from the experimental area (a) and the (relatively) clean location (b), (2018–2020) [14]

дала возможность установить наличие небольшого количества токсикантов в атмосферном воздухе жилой зоны рп. Средняя Ахтуба, а именно превышения: в 2018 г. — в 1,2 раза; в 2019 г. — в 1,3 раза; в 2020 г. — в 1,1 раза по сравнению с УЧЗ. В УЧЗ токсикантов не было обнаружено.

Исследование значений показателя количества аэрозольных частиц (N_{PM10} , %) свидетельствовало о том, что в УЧЗ в течение трех лет наблюдалось по неизвестной причине повышенное содержание аэрозольных частиц диаметром меньше 10 мкм, а превышения этого показателя в жилой зоне были небольшие, всего в 1,2–1,4 раза по сравнению со значениями этого показателя на контрольной территории. При этом в СНТ в радиусе 20 км отсутствует какая-либо антропогенная нагрузка, многие сельскохозяйственные поля долгое время не обрабатывались.

Между тем аэрозольный показатель массовой доли частиц позиционировал очень высокие значения ($D(d_{PM10}) = 34,56\%$) в жилой зоне рп. Средняя Ахтуба, превышающий значения из УЧЗ ($D(d_{PM10}) = 3,21\%$) до 11 раз, что свидетельствовало о металлических примесях в атмосферном воздухе жилой зоны в течение 2018–2020 гг.

Для установления возможного природного загрязнения на территории УЧЗ (на основании полученных значений по аэрозольному показателю N_{PM10} , %) применен метод дистанционного зондирования Земли и получены новые данные об исследуемом земельном участке в результате использования современной новейшей спутниковой системы (Landsat-8, США) [14], которые указали на очаги неизвестных поверхностных температурных аномалий, не связанных с антропогенной деятельностью, поскольку вблизи СНТ отсутствуют какие-либо промышленные предприятия, индустриальные комплексы и др. В связи с чем авторами прогнозируется возможное природное аэрозольное загрязнение территории, которое может исходить из активных (дегазирующих) геологических структур, поскольку известно, что поверхностные тепловые аномалии являются зеркальным отражением локальных внутренних геологических процессов и были обнаружены в районах действующих [15] и «спящих» [16] вулканов, в океанических внутриплитных магматических центрах [17], в зонах сейсмической активности [18], месторождениях полезных ископаемых [19] и др.

Табл. 4. Сравнительная характеристика содержания химических элементов в донных отложениях условно чистой зоны и кларковые значения, мкг/г

Table 4. Comparative characteristics of the content of chemical elements in bottom sediments of a conditionally clean zone and clarke values, mcg/g

Химические элементы Chemical elements	Содержание химических элементов в донных отложениях, мкг/г Content of chemical elements in bottom sediments, mcg/g	
	Условно чистая зона Conditionally clean zone	Кларковые значения Clark values
Pt	0,94	0,001–0,005 (N.N. Greenwood, A. Earnshaw, 1997) [20]
Pd	1,02	0,0001 (А.А. Беус и соавт., 1976) / (A.A. Beus et al., 1976) [21]

Апробация донных отложений в одном из очагов природных температурных аномалий в СНТ «Орошенец», «Шельф» (метод масс-спектрального анализа) указала на аномальное превышение кларковых значений [19, 20], например, по палладию (Pd), платине (Pt) (табл. 4) и другим химическим элементам, что может свидетельствовать о возможном проявлении неизвестного ранее месторождения твердых полезных ископаемых в Волгоградской области.

Подобные аномалии в виде превышений кларковых значений ранее выявлялись на других территориях Волгоградской области, где локальная антропогенная нагрузка отсутствует [21, 22], что может свидетельствовать о природном загрязнении территорий, обусловленном активностью геологических структур [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что экологический статус «условно чистой зоны» СНТ «Орошенец», «Шельф» (г. Волгоград) поставлен под сомнение, поскольку в результате интегральной оценки экологического состояния территории ей был присвоен 1 балл.

При этом при сравнении УЧЗ и жилой зоны, подверженной антропогенной нагрузке, по пяти исследованным аэрозольным показателям именно показатель количества аэрозольных частиц <10 мкм (N_{PM10} , %) в большей степени проявил индикаторные свойства на природное аэрозольное загрязнение территории СНТ. Оно могло быть спровоцировано проявлением месторождения твердых полезных ископаемых в виде активной геологической структуры с перманентной эксгаляцией из нее высокого содержания по количеству (%) аэрозольных частиц <10 мкм.

Природное загрязнение территории СНТ подтверждают данные новейших спутниковых систем (Landsat-8, США) в виде очагов поверхностных температурных аномалий в основании СНТ и его окрестностях, а также пробы донных отложений в одном из очагов температурных аномалий или «горячих точек», которые позволили обнаружить там элементы платиновой группы и др.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что данная территория характеризуется недостаточной изученностью местности в геологическом плане и выделение исследуемого земельного участка в 1980–1990 гг., как функциональной зоны для развития коллективных садов и дач, в прошлом, возможно, было поспешным решением, ошибкой со стороны советских государственных органов власти в области градостроительства. Экономически целесообразнее для региона этот земельный участок было бы использовать на тот момент для других целей, как инвестпроект, перспективный и инвестиционно привлекательный земельный участок в плане геологического изучения территории с целью обнаружения там месторождения твердых полезных ископаемых, в частности возможного месторождения драгоценных металлов, и строительства горно-обогатительного комбината.

Новый метод оценки экологического состояния земельных участков на основании аэрозольных показателей может быть рекомендован для оперативной оценки экологической ситуации с дальнейшим прогнозированием источников загрязнения на любой изучаемой территории с использованием данных новейших спутниковых систем (Landsat-8, США), в том числе может быть применен для коррекции существующих функциональных зон в уже разработанных и утвержденных генеральных планах населенных пунктов с целью решения проблем устойчивого развития городских и сельских поселений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Викулин А.С. Функциональное зонирование как инструмент рационального планирования городских территорий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 4. № 2. С. 56–63. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-56-63
2. Шабанова М.М., Абдуллаев Р.М. Генеральный план развития города как эффективный инструмент муниципального управления // Проблемы теории и практики управления развитием социально-экономических систем : сб. науч. тр. XIII Всерос. науч.-практ. конф. 2016. С. 258–260.
3. Шульц А.С. Экологические подходы к проектированию устойчивой городской среды // Architecture and Modern Information Technologies. 2021. № 1 (54). С. 227–235. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-227-235
4. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Матвеева Л.А. Геоэкологическое районирование и градостроительное зонирование поселений уровня «городской округ – город» // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2018. № 1. С. 68–78.
5. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Савицко И.С. Геоэкологические ограничения при проектировании реорганизации городского пространства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2017. № 4. С. 82–96.
6. Шаймарданова В.В. Функциональное зонирование как метод анализа пространственного развития городской агломерации // Вестник Удмуртско-

го университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2020. Т. 30. № 3. С. 349–356. DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-349-356

7. Трухачев С.Ю. Коллективные сады как новый тип жилья в крупнейших городах (на примере Ростова-на-Дону) // Городские исследования и практики. 2017. Т. 2. № 3 (8). С. 16–27. DOI: 10.17323/usp23201716-27

8. Šliaupa S., Zukauskas G., Zakarevicius A., Denas Z., Jakubienė M., Šliaupienė R. et al. The correlation of potential fields with psychic disorders and somatic diseases in Lithuania: what is behind it? // Medical Geology Newsletter. 2007. No. 10. Pp. 18–22.

9. Lukowski A., Popke R., Karolewski P. Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. Issue 10. Pp. 10296–10307. DOI: 10.1007/s11356-020-07672-0

10. Патент RU № 2746764, МПК G01N33/00, G01N35/00. Способ определения токсичности воздуха по реакции прорастания семян высших растений / И.Ю. Глинянова, В.Т. Фомичев; патентообл. ФГБОУ ВО ВолГТУ. 2021; заявл. № 2020128698 от 31.08.2020; опубл. 20.04.2021.

11. Глинянова И.Ю., Асанова Н.В., Ерофеев В.Т., Афонин В.В. Интегральная экспресс-оценка экологического состояния территорий с использованием аэрозолей // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 897–913. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.897-913

12. Hollander M., Wolfe D.A., Chicken E. Non-parametric Statistical Methods. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2014.

13. Свистов П.Ф., Полищук А.И., Перишина Н.А. Качественная оценка загрязнения окружающей среды (по данным о химическом составе атмосферных осадков) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2010. № 562. С. 76–94.

14. Glinyanova I., Asanova N. Research of urban atmospheric aerosols of the Lower Volga under conditions of anthropogenic load and active zones of Earth // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Issue 3–4. DOI: 10.1007/s11356-022-20865-z

15. Zaksek K., Hort M. Remote sensing of thermal anomalies on active volcanoes // Geodetski Vest-

nik. 2010. Vol. 54. Pp. 627–642. DOI: 10.15292/GEO-DETSKI-VESTNIK.2010.04.627-642

16. Eskandari A., De Rosa R., Amini S. Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 306. Pp. 41–57. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.001

17. Courtier A., Jackson M., Lawrence J., Wang Z., Lee C.T.A., Halama R. et al. Correlation of seismic and petrologic thermometers suggests deep thermal anomalies beneath hotspots // Earth and Planetary Science Letters. 2007. Vol. 264. Pp. 308–316. DOI: 10.1016/J.EPSL.2007.10.003

18. Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // Journal of Geodynamics. 2002. Vol. 33. Issue 4–5. Pp. 519–534. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00013-3

19. Huang W.L., Xu J.F., Chen J.L., Huang F., Zeng Y.C., Pi Q.H. et al. Geochronology and geochemistry of the Gejiu complex in the Yunnan Province, SW China: Petrogenesis and contributions of mantle-derived melts to tin mineralization // Acta Petrologica Sinica. 2016. Vol. 32. Issue 8. Pp. 2330–2346.

20. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the elements. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1997. 1359 p.

21. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.

22. Глинянова И.Ю., Фомичев В.Т. Мониторинг радиоактивных химических элементов (Th, U) в объектах окружающей среды как предмет инженерно-экологических изысканий на стадии предпроектных работ // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 3 (31). С. 54–67. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-54-67

23. Калинин В.В., Астахов А.С. Атмохимические ореолы рассеяния ртути над активными геологическими структурами северной части Японского моря // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1728–1737.

Поступила в редакцию 12 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Юрьевна Глинянова** — кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 298099, Scopus: 57204780096, ResearcherID: ABC-7057-2021, ORCID: 0000-0003-1388-1233; ecoris@yandex.ru;

Владимир Трофимович Ерофеев — доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 161483, Scopus: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, ORCID: 0000-0001-8407-8144; proshkina_o@inbox.ru;

Виктор Васильевич Афонин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 101166, Scopus: jJL-RYC-he5-UhV, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru.

Вклад авторов:

Глинянова И.Ю. — концепция исследования, сбор и обработка материала, написание исходного текста статьи, математическое описание модели.

Ерофеев В.Т. — научное руководство, научное редактирование текста.

Афонин В.В. — обработка материала, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vikulin A.S. Functional zoning as a tool for rational planning of urban territories. *Interexpo Geo-Siberia*. 2019; 4(2):56-63. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-56-63 (rus.).
2. Shabanova M.M., Abdullaev R.M. General plan for the development of the city as an effective tool of municipal management. *Problems of the theory and practice of managing the development of social and economic systems : collection of scientific papers of the XIII All-Russian scientific and practical conference*. 2016; 258-260. (rus.).
3. Schulz A. Ecological approaches in sustainable urban planning. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021; 1(54):227-235. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-227-235 (rus.).
4. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Matveeva L.A. Geoecological and urban zoning of settlements at the “city district – city” level. *Geoekologiya. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2018; 1:68-78. (rus.).
5. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Buldakov E.V., Savisko I.S. Geoenvironmental constraints for planning rearrangement of urban space. *Geoekologiya. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2017; 4:82-96. (rus.).
6. Shaimardanova V.V. Functional zoning as a method of analysis of spatial development of urban agglomeration. *Bulletin of the Udmurt University. “Series Biology. Earth Sciences”*. 2020; 30(3):349-356. DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-349-356 (rus.).
7. Trukhachev S.Yu. Collective gardens as a new type of housing in the largest cities (on the example of Rostov-on-Don). *Urban Studies and Practices*. 2017; 2(3):16-27. DOI: 10.17323/usp23201716-27 (rus.).
8. Šliaupa S., Zukauskas G., Zakarevicius A., Denas Z., Jakubieniene M., Šliaupienė R. et al. The correlation of potential fields with psychic disorders and somatic diseases in Lithuania: what is behind it? *Medical Geology Newsletter*. 2007; 10:18-22.
9. Lukowski A., Popek R., Karolewski P. Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020; 27(10):10296-10307. DOI: 10.1007/s11356-020-07672-0
10. Patent RU No. 2746764, IPC G01N33/00, G01N35/00. *A method for determining air toxicity by the reaction of seed germination of higher plants* / I.Yu. Glinyanova, V.T. Fomichev; patent area FGBOU VO VolgGTU. 2021; dec. No. 2020128698 dated 08/31/2020; publ. 04/20/2021. (rus.).
11. Glinyanova I.Yu., Asanova N.V., Erofeev V.T., Afonin V.V. Using aerosols to make an integrated rapid assessment of the ecological state of territories. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7):897-913. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.897-913 (rus.).
12. Hollander M., Wolfe D.A., Chicken E. *Non-parametric Statistical Methods*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
13. Svistov P.F., Polischouk A.I., Pershina N.A. The qualitative assessment of environmental pollution (according to the data about the chemical composition of atmospheric precipitations). *Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeikov*. 2010; 562:76-94. (rus.).
14. Glinyanova I., Asanova N. Research of urban atmospheric aerosols of the Lower Volga under conditions of anthropogenic load and active zones of Earth. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(3-4). DOI: 10.1007/s11356-022-20865-z
15. Zaksek K., Hort M. Remote sensing of thermal anomalies on active volcanoes. *Geodetski Vestnik*. 2010; 54:627-642. DOI: 10.15292/GEODETSKI-VESTNIK.2010.04.627-642
16. Eskandari A., De Rosa R., Amini S. Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015; 306:41-57. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.001
17. Courtier A., Jackson M., Lawrence J., Wang Z., Lee C.T.A., Halama R. et al. Correlation of seismic and petrologic thermometers suggests deep thermal anomalies beneath hotspots. *Earth and Planetary*

Science Letters. 2007; 264:308-316. DOI: 10.1016/J.EPSL.2007.10.003

18. Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *Journal of Geodynamics*. 2002; 33(4-5):519-534. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00013-3

19. Huang W.L., Xu J.F., Chen J.L., Huang F., Zeng Y.C., Pi Q.H. et al. Geochronology and geochemistry of the Gejiu complex in the Yunnan Province, SW China: Petrogenesis and contributions of mantle-derived melts to tin mineralization. *Acta Petrologica Sinica*. 2016; 32(8):2330-2346.

20. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the elements*. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 1997; 1359.

21. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2015; 2:7-17. (rus.).

22. Glinyanova I.Y., Fomichev V.T. Monitoring radioactive chemical elements (Th, U) in objects of the environment as the subject of engineering and ecological surveys at the stage of pre-design works. *Biospheric Compatibility: Man, Region, Technology*. 2020; 3:54-67. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-54-67 (rus.).

23. Kalinchuk V.V., Astakhov A.S. Atmochemical mercury dispersion aureoles over active geologic structures of the northern Sea of Japan. *Geology and Geophysics*. 2014; 55(12):1728-1737. (rus.).

Received July 12, 2022.

Adopted in revised form on March 17, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Irina Yu. Glinyanova** — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Life Safety in Construction and Urban Management; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 298099, Scopus: 57204780096, ResearcherID: ABC-7057-2021, ORCID: 0000-0003-1388-1233; ecoris@yandex.ru;

Vladimir T. Erofeev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering; **N.P. Ogarev National Research Mordovian State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 161483, Scopus: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, ORCID: 0000-0001-8407-8144; proshkina_o@inbox.ru;

Viktor V. Afonin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Information Processing and Management Systems; **N.P. Ogarev National Research Mordovian State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 101166, Scopus: jJL-RYC-he5-UhV, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Irina Yu. Glinyanova — the concept of the study, the collection and processing of material, writing the source text articles, mathematical description of the model.

Vladimir T. Erofeev — scientific guidance, scientific editing of the text.

Viktor V. Afonin — material processing, text editing.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 556:004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.595-606

Мониторинг и прогнозирование состояния сооружений в бассейнах малых рек юга России

Татьяна Викторовна Иванкова, Лев Николаевич Фесенко*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); г. Новочеркасск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Южным регионам России необходимо адаптироваться к более высокому пиковому стоку рек и внезапным наводнениям. С 1960 г. число зарегистрированных случаев наводнений увеличилось. Интенсивность и тяжесть случаев наводнений имеют тенденцию к снижению, но ежегодная частота их увеличивается. Это иллюстрирует социальную составляющую наводнений. Тенденции в количестве случаев наводнений тесно связаны с увеличением численности населения в долинах рек. «Интегрированное управление» объектами строительства в бассейнах рек основано на трех элементах: мониторинг, прогнозирование и раннее предупреждение; оценка уязвимости; смягчение последствий и реагирование. Цель исследования — создание средств прогнозирования, оценки риска эксплуатируемых строительных объектов в бассейнах рек с учетом нынешних природно-климатических факторов.

Материалы и методы. Использован фактический материал, собранный в полевых исследованиях в бассейнах рек рекреационных регионов юга России. Проведен анализ проектной, строительной и эксплуатационной документации комплексов сооружений и выполнена оценка их конструктивных элементов.

Результаты. На основе проведенных теоретических, натурных и численных исследований решена задача по повышению экологической безопасности городской среды за счет мониторинга, оценки, ранжирования технического состояния строительных объектов и прогнозирования рисков на урбанизированных территориях бассейнов рек. Результаты исследований следует рассматривать как базу практических методик для комплексной оценки экологической безопасности природно-технической системы бассейнов рек. Дальнейшая разработка темы может быть связана с масштабированием исследований урбанизированных территорий, мониторингом кризисных участков и прогнозированием дальнейшего состояния объектов строительства по субъектам.

Выводы. Разработанный программный комплекс имеет практическую значимость, продукт внедрен в Республике Крым, при работе длительно эксплуатируемых комплексов гидротехнических сооружений Партизанского водохранилища, обеспечивающих водой город федерального значения Симферополь, и Альминского водохранилища, орошающего Бахчисарайский район полуострова, также проходит апробацию в Краснодарском крае, Республике Дагестан, Ставропольском крае и на Кавказских Минеральных Водах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многофункциональный программный комплекс, горные реки, водное хозяйство, обследования, природно-технические системы, мониторинг и прогнозирование, оценка риска

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванкова Т.В., Фесенко Л.Н. Мониторинг и прогнозирование состояния сооружений в бассейнах малых рек юга России // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 595–606. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.595-606

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Викторовна Иванкова, academy-design@mail.ru.

Monitoring and forecasting the condition of structures in the small river basins in southern Russia

Tatyana V. Ivankova, Lev N. Fesenko*South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI)); Novocherkassk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The southern regions of Russia need to adapt to higher peak river flows and flash floods. Since 1960, the number of recorded flood events has increased. The intensity and severity of flood events tend to decrease, but their annual frequency is increasing. This illustrates the social component of flooding. Trends in the number of flood events are closely related to the increasing population in river valleys. “Integrated management” of construction sites in river basins is based on three elements: monitoring, forecasting and early warning, vulnerability assessment, mitigation and response. The purpose of this study is to establish means of prediction, risk assessment of operational construction projects in river basins taking into account the current natural and climatic factors.

Materials and methods. The research is based on the factual material collected in the field studies in the river basins of recreational regions of southern Russia. Design, construction and operational documentation of complex structures was analyzed and their structural elements were evaluated.

Results. On the basis of the carried out theoretical, field and numerical researches, the problem of increasing ecological safety of the urban environment was solved by monitoring, assessing, ranging of the technical condition of building structures and forecasting risks in the urbanized areas of river basins. The results of the research should be considered as a basis of practical methods for the complex estimation of ecological safety of natural and technical system of river basins. Further development of the topic can be connected with the scaling studies of urbanized territories, monitoring crisis sites and forecasting of the further condition of construction projects by subjects.

Conclusions. The developed software package has practical importance, the product is implemented in the Republic of Crimea, in the operation of the long-term operated HES complexes of the Partizanskoe reservoir supplying water to the city of federal importance Simferopol and the Almsky reservoir irrigating Bakhchisaray region of the peninsula and it is also being tested in the Krasnodar Territory, the Republic of Dagestan, the Stavropol Territory and Caucasian Mineral Waters.

KEYWORDS: multifunctional software package, mountain rivers, water management, surveys, natural and technical systems, monitoring and forecasting, risk assessment

FOR CITATION: Ivankova T.V., Fesenko L.N. Monitoring and forecasting the condition of structures in the small river basins in southern Russia. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):595-606. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.595-606 (rus.).

Corresponding author: Tatyana V. Ivankova, academy-design@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), восемь из 35 стран, подвергающихся наибольшему риску в результате изменения климата, уже испытывают крайний дефицит продовольствия [1]. Засуха, связанная с падением уровня воды в крупных реках, является международной логистической и экономической проблемой [2–4]. В настоящее время мир переживает общий экономический кризис, вызванный такими проблемами, как стремительный рост инфляции во многих странах, энергетический кризис, возникший в результате специальной военной операции и последующих санкций, введенных против страны, что повсеместно повлияло на стоимость газа и нефти. Этот сценарий еще больше усугубляет сложную ситуацию, которая отчасти уже затянулась после вспышки пандемии COVID-19.

С 1880 до 1940 г. среднегодовая температура Земли увеличилась на $0,2^\circ$ [5–7]. Затем, между 1940 и 1970 гг., температура была стабильной. И с 1970 г. она снова повышается на $0,18^\circ$ каждое десятилетие. Средняя глобальная температура увеличилась на $0,9^\circ$. Хотя между 1998 и 2013 гг. наблюдалась пауза, с тех пор глобальное потепление продолжается теми же темпами, что и раньше (рис. 1).

Изменение климата в России происходит быстрее, чем в среднем по миру: скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976–2019 гг. составила в среднем $0,49^\circ\text{C}$ за десять лет¹. Это превышает скорость роста глобальной температуры за тот же период более чем в 2,5 раза. Скорость роста температуры во всех регионах России значительно увеличивается в последние 30 лет. Температура воздуха с середины 1990-х по 2020 г. повысилась зимой более чем на 4°C , а летом — почти на $2,5^\circ\text{C}$ (рис. 2). На фоне изменения

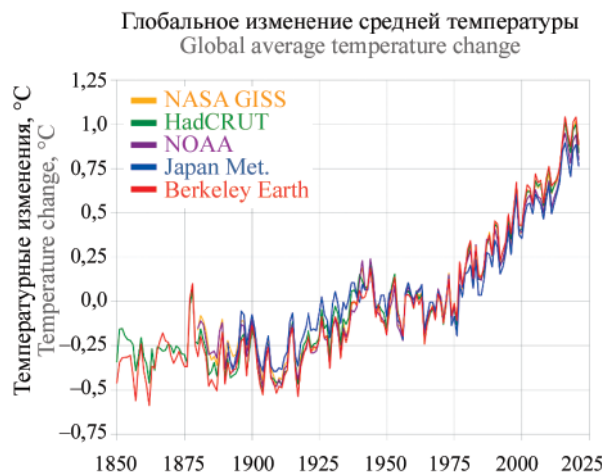


Рис. 1. График изменения среднегодовой температуры Земли [1]

Fig. 1. Graph of the change in the average annual temperature of the Earth [1]

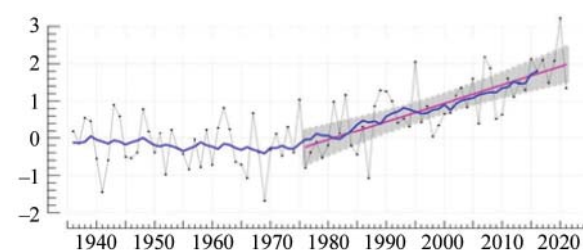


Рис. 2. График среднегодовых температурных аномалий в России, рассчитанных как отклонения от среднего значения за 1961–1990 гг.¹

Fig. 2. Graph of average annual temperature anomalies in Russia calculated as deviations from the average value for 1961–1990¹

¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.

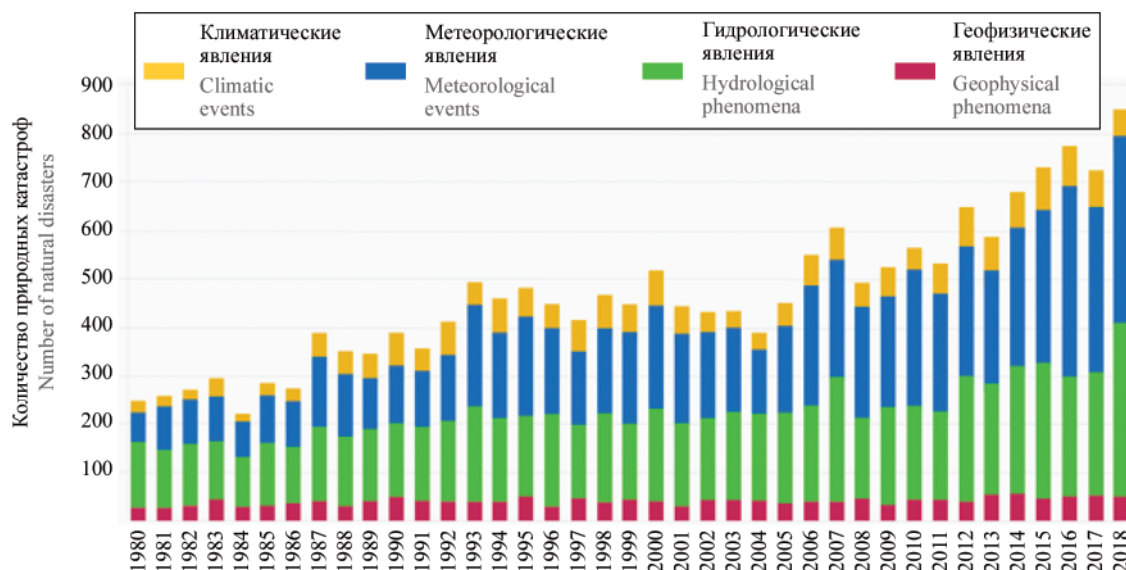


Рис. 3. Диаграмма природных катастроф России с 1980 по 2018 гг. [5]

Fig. 3. Diagram of natural disasters in Russia from 1980 to 2018 [5]

климата в России могут многократно участиться как засухи, так и наводнения.

Механизмы, управляющие вариациями климата, до сих пор недостаточно изучены, а выводы относительно глобального потепления, сделанные на основе математических моделей, могут быть подвергнуты критике. Однако, судя по ежегодным государственным докладом^{1, 2, 3, 4} и докладам межведомственной группы по изменению климата [1, 8], трансформация действительно происходит, что приводит к изменению количества атмосферных осадков во многих регионах: сокращается объем речного стока, засухи сменяются наводнениями⁵. Особенно это ощутимо в рекреационных регионах юга России. Эти регионы отличаются большим разнообразием природно-рекреационного обеспечения туризма и санитарно-курортной сферы. Наибольшей концентрацией курортов и внекурортных учреждений лечебного туризма отличаются Северо-Кавказский (Кавказские Минеральные Воды), Черноморский (Сочинская, Туапсинская, Геленджикская и Анапская курортные зоны) и Крымский районы.

Северный Кавказ и Причерноморское побережье — крупнейшая в стране рекреационно-туристическая зона. Тенденция к нарастанию урбанизации и плотности населения, технологической слож-

ности производства, рост числа опасных производственных объектов создают перспективу роста количества чрезвычайных ситуаций и числа пострадавших, величины материального ущерба. Развитие жилищного сектора и рекреационной базы вынуждает использовать под застройку даже крутые склоны, поймы горных рек [9], береговую зону. Одна из проблем — это неконтролируемая стихийная застройка [10] в зонах подтопления и даже в руслах рек, вследствие чего они неспособны пропустить через свое русло выпавшие ливневые осадки. В результате этого вода резко выходит за пределы русла реки — на территории населенных пунктов.

В течение года на малых горных причерноморских реках Кавказа отмечается до 25 (на каждой) высоких кратковременных паводков с интенсивным подъемом уровня воды до 500 см и выше, например на р. Гастогайка ($L = 35$ км) — 786 см, на р. Вулан ($L = 29$ км) — 622 см, на р. Туапсе ($L = 35$ км) — 671 см, на р. Мзымта ($L = 89$ км) — 496 см. Суммарный паводочный сток составляет на отдельных малых реках до 90 % годового. В последние 30 лет (1991–2021 гг.) на малых причерноморских реках расходы воды в период паводков превысили предыдущие наибольшие расходы в 1960–1990 гг. в 3–8 раз и достигли, например, на р. Вулан ($L = 29$ км, $F = 278$ км²) $Q_{\max} = 1050$ м³/с ($Q_{\text{ср.год}} = 6,57$ м³/с), на р. Туапсе ($L = 35$ км, $F = 352$ км²) $Q_{\max} = 2300$ м³/с ($Q_{\text{ср.год}} = 13,3$ м³/с).

На территории России продолжает наблюдаться рост годовой суммы осадков: со скоростью 2,1 % за 10 лет. Проблема климатических изменений выглядит особенно тревожно при анализе роста частоты природных катастроф на территории РФ: за последние почти 40 лет их количество возросло более чем в 4 раза (рис. 3). Число наводнений, вызванных

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с.

³ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с.

⁴ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М., 2019. 79 с.

⁵ Доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М.: Росводресурсы, НИИ-Природа, 2022. 510 с.

дождями в России, в 2019 г. стало превышать число наводнений, вызванных паводками. В 2020 г. по всей стране произошло в общей сложности 928 наводнений, более 80 % из которых были вызваны обильными дождями [11].

Ежегодно в стране происходит 40–70 крупных паводков и наводнений [12–14]. Наводнения на территории РФ занимают первое место в ряду стихийных бедствий и второе по смертности. Большинство чрезвычайных ситуаций на территории южных субъектов России, обусловленных наводнениями, происходит в зонах проживания и активной производственной деятельности, вследствие чего половодья и паводки вызывают все более катастрофические последствия. Еще одна причина большинства наводнений — нерасчищенные русла в условиях экстремальных осадков, заторы влияют на пропускную способность рек. Таким образом, мосты, пересекающие реки, являются потенциальными опасными преградами для прохождения паводка. Проведение многофакторных обследований по оценке прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности и выявление дефектов позволяют оценить текущее состояние сооружений.

За первые годы XXI в. по отношению к периоду 1970–1990 гг. существенно возросло количество смерчей, зарождающихся в Черном море и выходящих, в том числе, на Черноморское побережье [15, 16], перенося при этом значительные объемы морской воды, что порождает катастрофические паводки. Например, 8 августа 2002 г. выход серии смерчей с Черного моря на сушу в районе МО Новороссийска привел к затоплению 12 тыс. домов, из которых 379 были разрушены. Были повреждены и обрушены мосты, водозаборы, электростанции. Остановлено ж/д движение от Новороссийска до Крымска. Погибло 55 человек. За период с 2000 по 2021 гг. МЧС России и Северо-Кавказским Росгидрометом зафиксировано 435 случаев смерчей, из которых 57,1 % произошли в июле–августе. По оценкам ВМО повторяемость смерчей на юге России превысит к 2050 г. 100 случаев за сезон [17].

Сегодня отсутствуют научные основы алгоритмов построения имитационных моделей ранжирования и прогнозирования остаточного жизненного цикла объектов природно-технических систем в бассейнах малых рек. Актуальной задачей является обеспечение благоприятных условий жизнедеятельности населения путем сохранения экологической безопасности природно-технических систем. Существующие в России программные комплексы, на основе баз данных, по бассейнам малых рек содержат информацию о сооружениях с помощью дешифровки спутниковых снимков высокого разрешения, что решает ряд задач: инвентаризация водохранилищ, прудов и других водных объектов, определение месторасположения гидротехниче-

ских сооружений, наблюдение за изменением береговой линии рек и других водоемов. Однако в этих моделях не учитывается прогнозирование экологической безопасности с оценкой остаточного технического ресурса сооружений. Ранжирование объектов по классам опасности и расчет их остаточного ресурса, прогнозирование нагрузки на природно-техническую систему дает реальную картину состояния экологической ситуации в бассейне реки. Решение проблемы обеспечения гидрологической безопасности населения и экосистем во многом зависит от эффективности проведения не только научных, но и полевых исследований.

Для обеспечения информационной поддержки ведения государственного мониторинга водных объектов⁶ [18] необходимо создание комплексной программы в целях повышения эффективности информационно-аналитического обеспечения государственного управления водопользованием и снижения рисков от гидротехнических сооружений.

Целью проекта является реализация новой стратегии, нацеленной на создание средств прогнозирования [19], оценки риска эксплуатируемых транспортных, водохозяйственных и мелиоративных объектов в бассейнах рек, с учетом нынешних природно-климатических факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на фактическом материале, собранном в полевых исследованиях в бассейнах рек рекреационных регионов юга России. Проведен анализ проектной, строительной и эксплуатационной документации комплексов сооружений и выполнена оценка их конструктивных элементов согласно действующим нормам и правилам^{7, 8, 9}.

На первом этапе выполнялась комплексная оценка современного состояния системы бассейна, выявлялись естественные и антропогенные факторы, оказывающие наибольшее влияние на природ-

⁶ О безопасности гидротехнических сооружений : Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ: текст с изм. и доп. от 29.07.2018 № 271-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/

⁷ СП 58.13330.2019. Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Основные положения СНиП 33-01-2003 : введен 17.06.2020. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564542210>

⁸ ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : Принят Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии : введен 01.01.2014. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100941?section=status>

⁹ Об утверждении критериев классификации гидротехнических сооружений : Постановление Правительства РФ от 05.10.2020 № 1607. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74632297/>

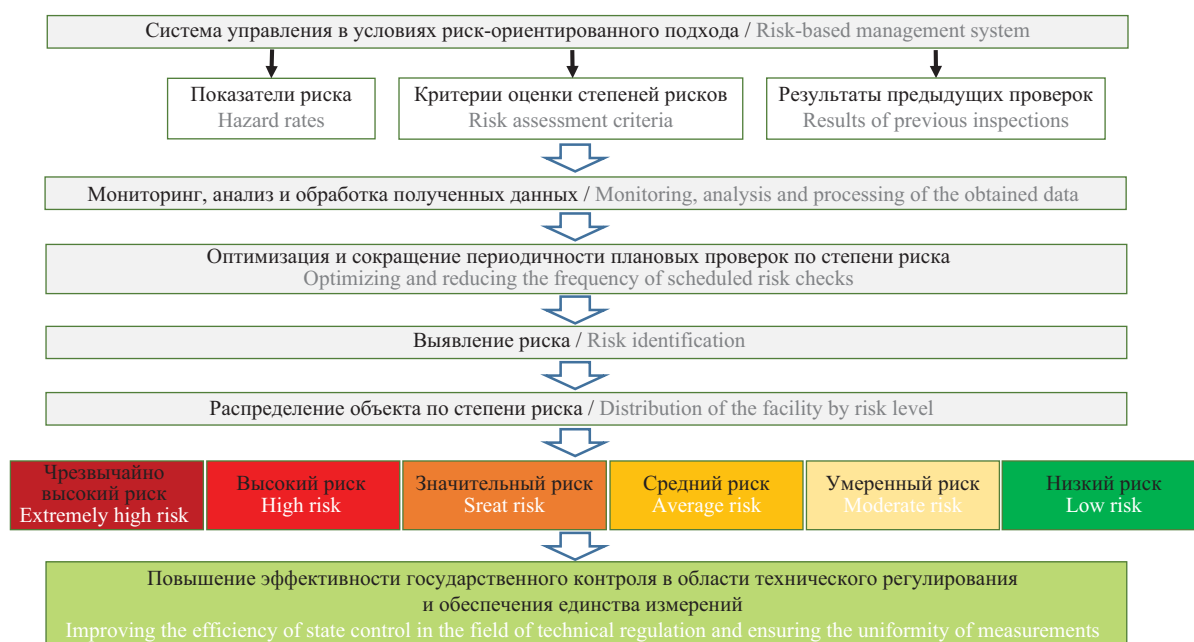


Рис. 4. Управление в условиях риск-ориентированного подхода

Fig. 4. Risk-based management

но-техническую систему (ПТС) бассейна. Далее выполнялось водохозяйственное районирование бассейна, анализ использования водных ресурсов, выявлялись показатели напряженности водохозяйственной обстановки, давалась оценка влияния антропогенных факторов на природно-техническую систему бассейна, определялись цели разработки плана управления речным бассейном и задачи, решение которых позволит добиться поставленной цели.

Предложено ранжирование обследуемых сооружений согласно риск-ориентированному подходу^{10, 11}. В целях снижения общей административной нагрузки на субъекты хозяйственной деятельности и повышения уровня эффективности контрольно-надзорной деятельности предложена схема перехода на риск-ориентированную модель контроля — от тотального контроля к дифференцированному планированию проверок в зависимости от уровня риска. Чем выше категория риска (класс опасности), тем чаще проводятся плановые проверки (рис. 4). Управление риском — меры, направленные на снижение уровня риска.

¹⁰ О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации : Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358750/

¹¹ О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля : Федеральный закон от 26.12.2008 № 294-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83079/

Оценка текущего состояния железобетонных конструкций необходима для планирования будущего технического обслуживания и оценки остаточного срока службы конструкций. Старение, воздействие экстремальных условий могут снизить функции безопасности бетонных конструкций и увеличить риски.

Современные системы мониторинга на обследуемых территориях установлены только на крупнейших федеральных мостах. В то же время разрушение железобетонных мостов на каналах и реках может нанести не меньший экономический ущерб государству из-за большого их количества. Эксплуатирующие организации должны следить за состоянием мостовых сооружений. Согласно нормативным документам, мосты обязаны проходить проверки каждые пять лет¹², но зачастую на них не хватает средств. В большинстве случаев причиной обрушения мостов является износ, конструктивные ошибки и несоблюдение установленных весовых ограничений. Мостовые проезды подвергаются наибольшей нагрузке во время весенних паводков, а также зимних низких температур. В случае обрушения моста из-за чрезмерного износа ответственность за последствия ложится на соответствующие эксплуатационные и надзорные службы, в обязанности которых входит контроль за состоянием инженерных сооружений. Однако часто контроль за состоянием мостов отсутствует или проблемы выявляются, но мост продолжает эксплуатироваться. В связи с вышеизложенным проблема получения

¹² СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84. М., 2011. 346 с.

своевременной, полной и объективной информации для принятия оптимальных решений по планированию и организации обследований и ремонта мостовых сооружений, расположенных вдоль русла реки, становится очень актуальной.

В результате обследований бассейнов юга России были выявлены¹³ повреждения и дефекты железобетонных стен, железобетонных опор, балок моста, дорожного покрытия, ограждения. Преобладающими аварийными дефектами являются образование дефектов, нарушающих нормальную работу конструкции, нарушение стыковых соединений. Опасными дефектами, вызывающими ухудшение эксплуатационных свойств конструктивных элементов, являются трещины, отслаивание защитного слоя бетона, коррозия бетона.

При расчете остаточного срока службы длительно эксплуатируемых железобетонных мостов были использованы методики, описанные в монографии [20]. Общая оценка ущерба строительной конструкции рассчитывалась по формуле:

$$\xi = \frac{\alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2 + \dots + \alpha_i \xi_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (1)$$

где $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$ — средняя величина повреждений отдельных видов конструкций; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ — коэффициенты значимости отдельных видов конструкций для мостового сооружения.

По методике В.И. Соболева [21, 22] работоспособность системы строительных конструкций определяется из выражения:

$$J_c = 1 - \xi_c, \quad (2)$$

где ξ_c — общий физический износ системы, который рассчитывается по формуле:

$$\xi_c = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{kj} \cdot Z_j}{\sum_{j=1}^m Z_j}, \quad (3)$$

где ξ_{kj} — физический износ конструкций системы j -го вида; Z_j — коэффициенты влияния j -х видов конструкций на состояние других; m — общее количество видов конструкций в системе. Физический износ конструкции системы определяется из выражения:

$$\xi_{kj} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \frac{P_i}{P_k}, \quad (4)$$

где ξ_i — физический износ участка конструкции; P_i — размеры (длина или площадь) поврежденного участка, измеряемые в метрах или m^2 ; P_k — размеры всей конструкции так же в метрах или в m^2 ; n — число поврежденных участков.

¹³ СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86. М., 2012. 34 с.

Остаточный ресурс здания или сооружения определяется по формуле:

$$P = \frac{(J_c - 0,75) \cdot 100 \%}{k}, \quad (5)$$

где 0,75 — минимальное значение коэффициента надежности для зданий и сооружений (соответствует неработоспособному состоянию сооружения); k — коэффициент скорости физического износа, выражается в % и определяется по формуле:

$$k = k_{н.э} + k_n, \quad (6)$$

где $k_{н.э}$ — коэффициент скорости физического износа сооружения, учитывающий условия эксплуатации; k_n — нормативный коэффициент износа, определяемый по формуле:

$$k_n = \frac{100}{T_n}, \quad (7)$$

где T_n — нормативный срок службы здания или сооружения.

Выполненные расчеты показали возможность определения оставшегося срока службы мостового сооружения по каналам и руслам рек. Предлагаемый подход [23] к определению коэффициента значимости сооружения как отношения объема возможного обрушения моста в результате его аварии к общему объему моста позволит более точно отразить несущую способность сооружения. Полное или частичное разрушение объектов городского хозяйства в русле реки создает реальную угрозу обрушения конструкций и может привести к авариям с материальным ущербом и человеческим жертвам.

Предложено управление безопасностью с помощью баз данных (БД), они позволяют выявить наиболее кризисные зоны, в которых необходимо реализовать меры по улучшению экологической обстановки [24, 25]. Создание каталога водотоков и соответствующей БД потенциально способно обеспечить решение задач оптимизации природопользования в бассейнах малых рек [26].

По результатам авторских исследований была составлена структура для формирования баз данных объектов строительства по критериальным значениям, техническому состоянию и оценке уровня безопасности (рис. 5).

Разработана многофункциональная программа¹⁴ для мониторинга и прогнозирования состояния длительно эксплуатируемых сооружений в бассейнах малых горных рек. Особенностью данной программы является то, что она позволяет

¹⁴ Свидетельство о регистрации программы ЭВМ RU 2022611794. Многофункциональный программный комплекс «Геоинформационная система объектов городского, транспортного и водохозяйственного строительства бассейна малой реки Альма Республики Крым» / Т.В. Иванкова. № 2022611794, дата регистрации 01.02.2022.

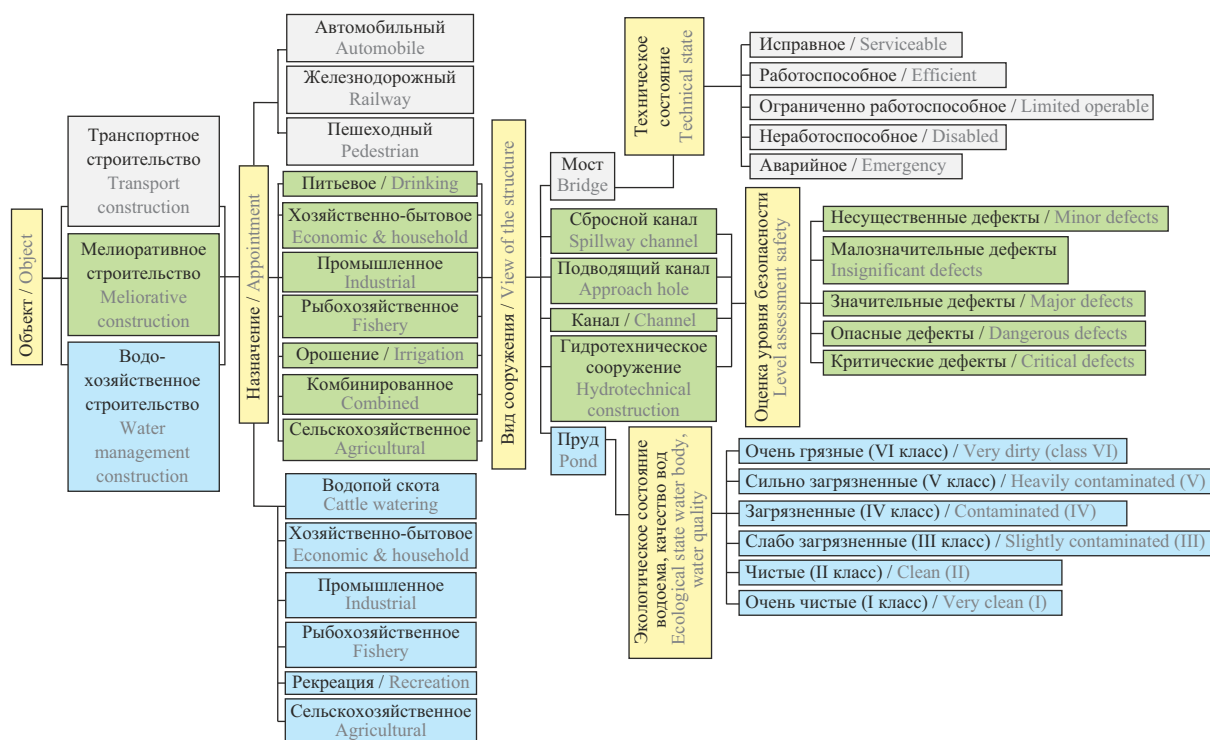


Рис. 5. Общая структура модели многофункционального программного комплекса

Fig. 5. General structure of multifunctional software package model

ранжировать сооружения по степени риска согласно данным и результатам многофакторных обследований. В программу внедрена методика расчета остаточного жизненного цикла, которая рассчитывает оставшийся эксплуатационный срок службы объекта.

Для ведения многофункциональной программы используется материал, получаемый в результате обследования и инвентаризации. Программный комплекс позволяет осуществлять поиск и фильтрацию сооружений по различным параметрам, в нем реализована возможность добавления, редактирования, удаления объектов строительства, ранжирования техногенных объектов по классу опасности и остаточному жизненному циклу. Модель позволяет создавать новые типы объектов и настраивать параметры сооружений, формировать список «избранных объектов» для каждого пользователя системы, а также группировать объекты и сооружения с визуальным отображением статистических данных на карте. Каждое сооружение привязано к координатной сетке и отображается в интерактивном виде в Яндекс.Карты и Google Maps. Программа направлена на решение широкого спектра задач: инвентаризация, мониторинг, управление, планирование, оценка состояния и прогноз. Разработанный программный продукт включает функциональные возможности:

- реализован механизм пространственного запроса поиска сооружений;

- запрос на основе параметров классификации сооружений;
- формирование сводных отчетов на основе пространственных запросов с возможностью экспорта в другие программные продукты;
- возможность интегрировать различные способы описания (база данных, текст, фото- и видеоматериалы);
- создан механизм описания и хранения метаданных об используемых и создаваемых пространственных объектах;
- разграничены уровни доступа к базе данных (пользователь, редактор, администратор).

Такой подход обеспечивает возможность предоставления разноплановой информации о состоянии объектов в бассейне рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании обобщения проведенных исследований:

- разработана и зарегистрирована программа расчета остаточного срока службы длительно эксплуатируемых сооружений. Выполненные расчеты показали возможность определения оставшегося срока службы мостовых сооружений по каналам и руслам рек¹⁵;

¹⁵ Свидетельство о регистрации программы ЭВМ RU 2021681666. Программа расчета управленческих решений водопользования в бассейне малой реки Альма Республики Крым для разных лет водообеспеченности / Т.В. Иванкова. № 2021681666, дата регистрации 24.12.2021.

- разработана система для сбора данных по объектам транспортного, мелиоративного и водохозяйственного строительства в бассейне малых рек. Каждая база содержит обработанную информацию: параметры сооружения, функциональное назначение, морфометрические признаки, геоморфологические особенности, физико-химические исследования проб воды, оценку технического состояния;

- разработана цифровая модель, которая является комплексной системой для сбора, хранения, анализа, а также отображения данных. Она позволяет осуществлять поиск и фильтрацию сооружений по различным параметрам, в ней реализована возможность добавления/редактирования/удаления объектов строительства, ранжирования техногенных объектов по классу опасности и остаточному жизненному циклу. Модель позволяет создавать новые типы объектов и настраивать параметры сооружений, формировать список «избранных объектов» для каждого пользователя системы, а также группировать объекты и сооружения с визуальным отображением статистических данных на карте. Каждое сооружение привязано к координатной сетке и отображается в интерактивном виде в Яндекс.Карты (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Более 300 млн человек во всем мире живут в дельтах рек. Строительство дестабилизирует бе-

рега рек, поэтому увеличивается эрозия. Последствия прямого вмешательства человека в бассейны и долины рек могут быть упущены из виду, когда основное внимание уделяется изменению климата. Последствия строительства мостов на реках, которые не подвергаются многофакторным исследованиям, опережают растущие угрозы, связанные с изменением климата. Последствия для густонаселенных речных дельт будут драматичными.

Существующие в России программные комплексы на основе баз данных по бассейнам малых рек содержат информацию о сооружениях с помощью дешифровки спутниковых снимков [27] высокого разрешения, что решает ряд задач: инвентаризация водохранилищ, прудов и других водных объектов, определение месторасположения гидротехнических сооружений, наблюдение за изменением береговой линии рек и других водоемов. Однако в этих моделях не учитывается прогнозирование экологической безопасности с оценкой остаточного технического ресурса сооружений. Ранжирование объектов по классам опасности и расчет их остаточного ресурса, прогнозирование нагрузки на природно-техническую систему дает реальную картину состояния экологической ситуации в бассейне реки. Решение проблемы обеспечения гидрологической безопасности населения и экосистем во многом зависит от эффективности проведения не только научных, но и полевых исследований.

Рис. 6. Фрагмент экранной формы цифровой модели

Fig. 6. Digital model screen fragment

Теоретическая значимость результатов проекта состоит в разработке и научном обосновании структуры МПК для обеспечения экологической безопасности эксплуатируемых строительных объектов в бассейнах малых рек. Практическая значимость и реализация результатов работы заключаются в:

- определении текущего состояния ПТС бассейна малой реки и прогнозировании антропогенного изменения экологических характеристик бассейна;

- разработке модели МПК, отражающей экологическое состояние урбанизированной территории с указанием технического состояния и остаточного ресурса строительных объектов на ней, что позволяет оптимизировать комплекс мероприятий по обеспечению экологической безопасности ПТС. МПК является комплексной моделью, направленной на решение широкого спектра задач: инвентаризация, мониторинг, управление, планирование, оценка состояния и прогноз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p.
2. Суздалева А.Л. Россия и глобальный водный кризис // Мировая экономика и международные отношения. 2020. Т. 64. № 4. С. 53–59. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-4-53-59
3. Слесарев М.Ю. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства : учеб.-метод. пос. М. : МИСИ – МГСУ, 2020. 103 с.
4. Слесарев М.Ю., Иванкова Т.В., Фесенко Л.Н. Состояние объектов мелиоративного строительства в бассейне малой реки Альма Республики Крым // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 1. С. 15–22. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-1-15-22
5. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., García-Herrera R. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe // Science. 2011. Vol. 332. Issue 6026. Pp. 220–224. DOI: 10.1126/science.1201224
6. Coumou D., Rahmstorf S. A decade of weather extremes // Nature Climate Change. 2012. Vol. 2. Pp. 491–496. DOI: 10.1038/NCLIMATE1452
7. Sakalli A., Başusta N. Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // International Journal of Climatology. 2018. Vol. 38. Pp. 4687–4698. DOI: 10.1002/joc.5688
8. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team. Geneva : IPCC, 2014.
9. Ivankova T.V. Problem of environmental remediation of the river runoff of basin geosystem of the small river Alma (Republic of Crimea) // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. P. 07007. DOI: 10.1051/e3sconf/202021007007
10. Ivankova T.V. Determination of the anthropogenic load degree in the basin of the small Alma river // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Issue 4. P. 042031. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042031
11. Порфирьев Б.Н., Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М., Ксенофонов М.Ю., Ревич Б.А., Школьник И.А. и др. Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы / под ред. Б.Н. Порфирьева, В.И. Данилова-Данильяна. М. : Научный консультант, 2022. 513 с.
12. Абшаев М.Т., Агзагова М.Б., Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Ананичева М.Д., Асоян Д.С. и др. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Российской Федерации / под ред. С.К. Шойгу. М. : Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с.
13. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христовых А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования : монография. М. : Географический ф-т МГУ, 2011. 367 с.
14. Алексеевский Н.И., Гладкевич Г.И. Водные ресурсы в мире и в России за 100 лет // Россия в окружающем мире: 2003 : аналитический ежегодник. М. : МНЭПУ, 2003. С. 114–158.
15. Ткаченко Ю.Ю., Перов Е.А., Денисов В.И. Атлас опасных природных явлений Краснодарского края : монография; Южный федеральный университет. Ростов н/Д ; Таганрог : Изд-во Южного федерального университета, 2018. 160 с.
16. Риски катастрофических наводнений на территории России в начале XXI века: анализ и управление // Оценка и управление природными рисками. Т. 1. М. : Изд-во РУДН, 2003. С. 293–297.
17. Ткаченко Ю.Ю., Денисов В.И., Перов Е.А. Морские водяные смерчи на Черноморском побережье Краснодарского края, наблюдение, прогнозирование // Экология. Экономика. Информатика. Серия: геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2019. № 4. С. 164–170.
18. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений : монография. Пермь, 2017. 148 с.

19. Суздалева А.Л. Создание управляемых природно-технических систем. М. : Энергия, 2016. 160 с.
20. Волосухин В.А., Крахмальний Т.А., Евтушенко С.И., Крахмальная М.П. Дефекты и повреждения строительных конструкций мостов на мелиоративных каналах Ростовской области. Новочеркасск : ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова, 2013. 126 с.
21. Соболев В.И., Евтушенко С.И., Соболев В.В., Шутова М.Н., Химишев З.Х. Методика определения остаточного ресурса на основе разработки структурной схемы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 2. Прил. № 2. С. 110–112.
22. Соболев В.И., Евтушенко С.И., Соболев В.В., Шутова М.Н., Химишев З.Х. Предварительный расчет остаточного ресурса на основе результатов оценки надежности конструкций по внешним признакам // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 2. Прил. № 2. С. 113–115.
23. Крахмальная М.П. Разработка методики оценки технического состояния, расчета остаточно-

го ресурса и мониторинга железобетонных автодорожных мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2015. 23 с.

24. Duncan A.E., De Vries N., Nyarko K.B. The effectiveness of water resources management in Pra Basin // *Water Policy*. 2019. Vol. 21. Issue 4. Pp. 787–805. DOI: 10.2166/wp.2019.123

25. Fidelis T., Rodrigues C. The integration of land use and climate change risks in the Programmes of Measures of River Basin Plans — assessing the influence of the Water Framework Directive in Portugal // *Environmental Science and Policy*. 2019. Vol. 100. Pp. 158–171. DOI: 10.1016/J.ENVSCL.2019.06.013

26. Forman R.T.T. Urban regions — ecology and planning beyond the city. Cambridge University Press. 2008. 478 p.

27. Щербина Е.В., Слепнев М.А. Экологическое картографирование при градостроительном проектировании природно-антропогенных территориальных комплексов // *Экология урбанизированных территорий*. 2016. № 2. С. 92–97.

Поступила в редакцию 9 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Викторовна Иванкова — кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры водного хозяйства, инженерных сетей и защиты окружающей среды; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 804625, Scopus: 57209806818, ORCID: 0000-0003-0902-9670; academy-design@mail.ru;

Лев Николаевич Фесенко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного хозяйства, инженерных сетей и защиты окружающей среды; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 461079, Scopus: 6603681244, ORCID: 0000-0001-6570-0460; academy-design@mail.ru.

Вклад авторов:

Иванкова Т.В. — сбор и обработка материала, разработка программного комплекса, написание методологии, исходного текста и его доработка в соответствии с предоставленными корректировками, формирование результатов и выводов.

Фесенко Л.Н. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. IPCC: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021; 2391. DOI: 10.1017/9781009157896.
2. Suzdaleva A.L. Russia and global water crisis. *World Economy and International Relations*. 2020; 64(4): 53-59. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-4-53-59 (rus.).
3. Slesarev M.Yu. *Environmental safety of construction and urban economy : educational and methodological manual*. Moscow, 2020; 103. (rus.).
4. Slesarev M.Yu., Ivankova T.V., Fesenko L.N. Condition of reclamation construction facilities in the basin of the small alma river of the Republic of Crimea. *Ecology of Urban Areas*. 2022; 1:15-22. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-1-15-22 (rus.).

5. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., García-Herrera R. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*. 2011; 332(6026):220-224. DOI: 10.1126/science.1201224
6. Coumou D., Rahmstorf S. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*. 2012; 2:491-496. DOI: 10.1038/NCLIMATE1452
7. Sakalli A., Başusta N. Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100. *International Journal of Climatology*. 2018; 38:4687-4698. DOI: 10.1002/joc.5688
8. IPCC: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014; 151.
9. Ivankova T.V. Problem of environmental remediation of the river runoff of basin geosystem of the small river Alma (Republic of Crimea). *E3S Web of Conferences*. 2020; 210:07007. DOI: 10.1051/e3s-conf/202021007007
10. Ivankova T.V. Determination of the anthropogenic load degree in the basin of the small Alma river. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 459(4):042031. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042031
11. Porfir'ev B.N., Danilov-Danil'yan V.I., Kattsov V.M., Ksenofontov M.Yu., Revich B.A., Shkol'nik I.A. et al. *Climate change and the Russian Economy: Trends, scenarios, forecasts*. B.N. Porfirieva, V.I. Danilov-Danilyan (ed.). Moscow, 2022; 513. (rus.).
12. Abshayev M.T., Agzagova M.B., Adjiev A.X., Ajieva A.A., Ananicheva M.D., Asoyan D.S. et al. *Atlas of natural and man-made hazards and risks of emergencies of the Russian Federation*. Moscow, Dizayn. Informatsiya. Kartografiya Publ., 2010; 696. (rus.).
13. Alekseevsky N.I., Frolova N.L., Khristoforov A.V. *Monitoring of hydrological processes and improving the safety of water use : monograph*. Moscow, Geographical staff of Moscow State University, 2011; 367. (rus.).
14. Alekseevsky N.I., Gladkevich G.I. Water resources in the world and in Russia for 100 years. *Russia in the surrounding world: 2003 : Analytical yearbook*. Moscow, MNEPU, 2003; 114-158. (rus.).
15. Tkachenko Yu.Yu., Perov E.A., Denisov V.I. *Atlas of dangerous natural phenomena of the Krasnodar Territory : monograph; Southern Federal University*. Rostov-on-Don, Taganrog, Southern Federal University, 2018; 160. (rus.).
16. Risks of catastrophic floods in Russia at the beginning of the 21st century: analysis and management. *Assessment and management of natural risks*. Volume 1. Moscow, RUDN University. 2003; 293-297.
17. Tkachenko Yu.Yu., Denisov V.I., Perov E.A. Sea water tornadoes on the Black Sea coast of the Krasnodar Territory, observation, forecasting. *Ecology. Economics. Informatics*. Series: geo-information technologies and space monitoring. 2019; 4:164-170. DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-164-170
18. Pyankov S.V. *Geo-information support for modeling hydrological processes and phenomena : monograph*. Perm, 2017; 148. (rus.).
19. Suzdaleva A.L. *Creation of controlled natural and technical systems*. Moscow, Energiya Publ., 2016; 160. (rus.).
20. Volosukhin V.A., Krakhmal'nyy T.A., Evtushenko S.I., Krakhmal'naya M.P. *Defects and damages of building structures of bridges on reclamation canals of Rostov Region*. Novocherkassk, 2013; 126. (rus.).
21. Sobolev V.I., Yevtushenko S.I., Sobolev V.V., Shutova M.N., Khimishev Z.H. Methodology for determining the residual resource based on the development of a structural scheme. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2006; 2:110-112. (rus.).
22. Sobolev V.I., Yevtushenko S.I., Sobolev V.V., Shutova M.N., Khimishev Z.H. Preliminary calculation of the residual life based on the results of the assessment of the reliability of structures by external features. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2006; 2:113-115. (rus.).
23. Starchalnaya M.P. *Development of a methodology for assessing the technical condition, calculating the residual life and monitoring reinforced concrete road bridges : abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Rostov-on-Don, 2015; 23. (rus.).
24. Duncan A.E., De Vries N., Nyarko K.B. The effectiveness of water resources management in Pra Basin. *Water Policy*. 2019; 21(4):787-805. DOI: 10.2166/wp.2019.123
25. Fidélis T., Rodrigues C. The integration of land use and climate change risks in the Programmes of Measures of River Basin Plans — assessing the influence of the Water Framework Directive in Portugal. *Environmental Science & Policy*. 2019. DOI: 10.1016/J.ENVSCI.2019.06.013
26. Forman R.T.T. Contents. *Urban regions: Ecology and planning beyond the city*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008; 478.
27. Shcherbina E.V., Slepnev M.A. Ecological mapping at urban design natural-anthropogenic territorial complexes. *Ecology of Urban Areas*. 2016; 2:92-97. (rus.).

Received January 9, 2023.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Tatyana V. Ivankova** — Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Water Management, Engineering Networks and Environmental Protection; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 804625, Scopus: 57209806818, ORCID: 0000-0003-0902-9670; academy-design@mail.ru;

Lev N. Fesenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Management, Engineering Networks and Environmental Protection; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 461079, Scopus: 6603681244, ORCID: 0000-0001-6570-0460; 65613@mail.ru.

Contribution of the authors:

Tatyana V. Ivankova — collection and processing of the material, development of the software package, writing of the methodology, the source text and its revision in accordance with the provided adjustments, formation of results and conclusions.

Lev N. Fesenko — scientific leadership, research concept, development of the methodology, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.05:553

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.607-614

Геоэкологические условия строительства технопарка по программе реновации региона Налайх (Монголия)

Антонина Львовна Суздалева, Михаил Юрьевич Слесарев,
Болортуя Жаргалсайхан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Добыча полезных ископаемых является одной из основ экономического развития современной Монголии. Реновацию территорий горнопромышленных районов в силу ее специфических особенностей можно рассматривать как отдельное направление градостроительной деятельности. Цель исследования — изучение геоэкологических условий региона Налайх для реализации разрабатываемой Правительством Монголии программы его реновации, в ходе которой планируется построить 50 заводов по производству строительных материалов, 10 заводов по производству стекла, а также предприятия по переработке овечьей шерсти.

Материалы и методы. Фактической основой послужили результаты комплексных исследований, проведенных в 2019–2021 гг. Они включали оценку характера и масштабов техногенной трансформации земной поверхности и определение уровня загрязнения основных компонентов окружающей среды, способных накапливать значительные количества токсичных веществ, в качестве которых рассматривались почвы, грунты и подземные воды.

Результаты. На территории площадью свыше 50 тыс. га проведена оценка уровня техногенной трансформации и степени загрязненности земной поверхности тяжелыми металлами. Определено содержание тяжелых металлов в подземных водах. Выполнено зонирование территории в соответствии с характером трансформации ее геоэкологических условий. Выявлены техногенные геохимические аномалии, возникшие в результате миграции загрязнителей из отходов угольных шахт.

Выводы. Для успешной реализации программы реновации необходимо осуществить комплекс мер по улучшению геоэкологических условий, включая ликвидацию частных выработок и техногенных геохимических аномалий, образовавшихся в результате накопления загрязнителей на ряде участков исследованного региона. В период строительства сооружений технопарка и в ходе их последующей эксплуатации следует запретить использование загрязненных подземных вод, в том числе из уже пробуренных скважин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: добыча угля, геоэкологические условия, тяжелые металлы, техногенная геохимическая аномалия, опасные геологические процессы и явления, дефляция, программа реновации, Монголия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суздалева А.Л., Слесарев М.Ю., Жаргалсайхан Б. Геоэкологические условия строительства технопарка по программе реновации региона Налайх (Монголия) // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 607–614. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.607-614

Автор, ответственный за переписку: Антонина Львовна Суздалева, SuzdalevaAL@yandex.ru.

Geoecological conditions for the construction of a technology park under the Nalaikh region renovation programme (Mongolia)

Antonina L. Suzdaleva, Mikhail Yu. Slesarev, Bolortuya Jargalsaihan

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

ABSTRACT

Introduction. Mining is one of the mainstays of economic development in Mongolia today. Renovation of mining areas because of its specific features can be regarded as a separate direction of urban development. The aim of the study is to research the geoecological conditions in Nalaikh region to support the implementation of the government renovation programme. The programme will include the construction of 50 building material factories, 10 glass factories as well as sheep wool processing plants.

Materials and methods. The work is based on the results of comprehensive studies carried out in 2019–2021. They included assessment of the nature, extent of anthropogenic transformation of the earth's surface and determination of the level of contamination of the main components of the environment capable of accumulating significant amounts of toxic substances (soils and groundwater).

Results. The level of anthropogenic transformation and degree of pollution of the earth's surface with heavy metals has been estimated on the territory of more than 50 thousand hectares. The content of heavy metals in groundwater has been

determined. Zoning of the territory was carried out in accordance with the character of transformation of its geoecological conditions. Anthropogenic geochemical anomalies resulting from pollutant migration from coal mine dumps have been identified.

Conclusions. For the successful implementation of the renovation programme, it is necessary to implement a set of measures to improve geoecological conditions, including the elimination of private mine workings and anthropogenic geochemical anomalies formed as a result of the accumulation of pollutants in some parts of the studied region. The use of contaminated groundwater, including from wells already drilled, should be prohibited during the construction of the technology park facilities and during their subsequent operation.

KEYWORDS: coal mining, geoecological conditions, heavy metals, anthropogenic geochemical anomalies, deflation, the renovation programme, Mongolia

FOR CITATION: Suzdaleva A.L., Slesarev M.Yu., Jargalsaihan B. Geoecological conditions for the construction of a technology park under the Nalaikh region renovation programme (Mongolia). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):607-614. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.607-614 (rus.).

Corresponding author: Antonina L. Suzdaleva, SuzdalevaAL@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе значимое место в градостроительной деятельности приобретает возведение зданий и сооружений на участках, где ранее существовали объекты капитального строительства (ОКС). Для обозначения этой деятельности, целью которой является изменение функционального предназначения участка территории, а также для улучшения социально-бытовых и экологических условий часто используется термин «реновация» [1–3]. В процессе реновации не только сносятся все существовавшие строения, но нередко осуществляется и трансформация рельефа (засыпка карьеров, террасирование склонов и пр.). Геоэкологические условия, под которыми в статье понимается структура и свойства окружающей среды (как участка земной поверхности), подвергаются значительным изменениям. Сформировавшиеся в процессе предшествующего техногенеза геоэкологические условия становятся фактором, способным осложнить реализацию программ реновации территорий и даже поставить под вопрос ее целесообразность. Наиболее известным примером подобных явлений можно считать случаи неожиданного обнаружения на стройплощадках захоронений радиоактивных и иных опасных отходов. Следует также учитывать меньшую устойчивость техногенно трансформированной геологической среды по отношению к развитию опасных экзодинамических геологических процессов (оползней, проседанию, разжижению грунтов и пр.) [4, 5].

Реновацию территорий горнопромышленных регионов в силу ее специфических особенностей можно рассматривать как отдельное направление данной деятельности [6, 7]. Практически все предприятия, занимающиеся добычей и первичной переработкой полезных ископаемых, обладают двумя особенностями, отличающими их от других крупномасштабных производственных объектов. Во-первых, продолжительность эксплуатации горнопромышленных предприятий детерминирована по времени, что обусловлено объемом полезных ископаемых, извлечение которых из недр эконо-

мически целесообразно. Во-вторых, за этот период в регионе возникает достаточно крупное поселение (поселок или даже город горняков) и образуются масштабные скопления промышленных отходов в форме терриконов, отвалов и хвостохранилищ [8]. В результате при выводе из эксплуатации горнопромышленного предприятия возникает обширная территория, окружающая среда которой подверглась глубокой техногенной трансформации и загрязнена компонентами добывавшихся полезных ископаемых, а ее население лишилось своих рабочих мест. Решение данного комплекса проблем возможно путем реновации бывших горнопромышленных регионов. Успех этой деятельности во многом определяется возможностью превентивного решения геоэкологических проблем, позволяющих привести окружающую среду в состояние, пригодное для использования этого пространства, а именно: строительства и последующей эксплуатации новых производственных, коммунально-бытовых и инфраструктурных объектов. Цель настоящей работы — исследование геоэкологических условий на территории, окружающей выведенное из эксплуатации государственное угледобывающее предприятие «Налайх», и разработка рекомендаций, которые необходимо учесть при реализации разрабатываемой Правительством Монголии программы реновации данного региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для работы послужили результаты комплексных исследований, проведенных в 2019–2021 гг. Геоэкологические условия указанного региона формировались в течение длительного времени в процессе освоения угольного месторождения. Первые шахты, принадлежавшие частным компаниям, появились здесь в начале XX в. [9]. В 1922 г. было создано крупнейшее в Монголии государственное угледобывающее предприятие, которое функционировало до 1992 г. [10]. За десятилетия его работы возник г. Налайх с населением более 30 тыс. человек [11]. После закрытия

государственного угледобывающего предприятия оставшиеся без работы жители города занялись кустарной и мелкомасштабной добычей угля и глины, осуществляемой множеством мелких компаний и частными лицами. Эта деятельность практически не контролировалась. Многие выработки создавались без получения лицензии. Поэтому, несмотря на кажущиеся небольшие масштабы деятельности каждой из этих организаций, их суммарное негативное воздействие на геоэкологические условия дало ощутимые результаты. На многих участках возникли окруженные отвалами горные выработки, а недостаток внимания к охране труда привел к производственным травмам и гибели большого числа людей [12].

Исследование геоэкологических условий региона Налайх проводилось по двум ключевым направлениям:

1. Оценка характера и масштабов техногенной трансформации земной поверхности, в ходе которой отмечались распределение и площади различных участков: с искусственно измененным рельефом; с утраченным или сильно трансформированным естественным почвенным покровом; застроенных объектами различного предназначения; и занятых руинизированными сооружениями.

2. Оценка уровня загрязнения выполнялась по основным компонентам окружающей среды, способным накапливать значительные количества токсичных веществ, в качестве которых рассматривали почвенно-грунтовый покров и подземные воды. Отбор проб подземных вод проводился из многочисленных скважин, пробуренных в районе исследования в предшествующие годы. С точки зрения целей исследования наибольший интерес представляли стойкие загрязнители. К ним относятся тяжелые металлы, концентрация которых в углях может быть весьма значительной [13–15]. Именно этой группе загрязнителей уделялось основное внимание. В пробах почв (грунтов) и подземных вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) [16, 17] с помощью установки ICP40B были обнаружены: Pb, As, Zn, Cu, Cd, Ni, Mo, V.

Оценка полученных результатов осуществлялась на основе государственных стандартов Монголии:

- MNS 5850:2019 «Нормативные значения содержания загрязняющих элементов в почве»;
- MNS 6148:2010 «Качество воды. Нормативные значения содержания загрязняющих элементов в подземных водах».

В некоторых случаях добыча угля обуславливает поступление в среду радиоактивных элементов [18]. Но, согласно отчетам Института географии и геоэкологии Академии наук Монголии, превышение радиационного фона, а также содержание радио-нуклидов, превышающее предельно допустимые уровни, вблизи шахты «Налайх» и частных угольных выработок не отмечено.

Для обработки полученных материалов использовался метод кластерного анализа [19]. Его применение дает возможность выделять во множестве разнородных данных определенные группы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая площадь территории, на которой проводились исследования, превышала 50 тыс. га. По степени техногенной трансформации окружающей среды в ее пределах можно выделить несколько различных зон:

1. Производственная зона, включающая участки с разрушающимися сооружениями и необратимо трансформированным рельефом, причиной чего являлась государственная и частная добыча угля.

2. Селитебная зона, к которой относятся как районы размещения жилых ОКС г. Налайх, так и его юрточные районы. В селитебной зоне также расположена ТЭЦ, работающая на угле.

3. Зона техногенных геохимических аномалий — совокупность участков, ландшафт которых не претерпел существенных изменений в результате добычи угля или урбанизации, но в образцах почвы и подземных вод которых зафиксировано превышение естественного уровня ряда техногенных элементов. В качестве последних можно рассматривать любые химические элементы, увеличение содержания которых обусловлено загрязнением окружающей среды в процессе добычи угля и его первичной переработки [20].

4. Зона, не подвергшаяся техногенной трансформации, к которой мы относим участки с сохранившимся ландшафтом, сформировавшимся до начала угледобычи (включая территории, используемые в сельскохозяйственных целях, главным образом в качестве пастбищ), и в пробах из которых не отмечалось устойчивого превышения содержания техногенных элементов.

Данные, характеризующие соотношение площадей этих зон, представлены в табл. 1.

Геоэкологические условия на площади более 40 тыс. га подверглись техногенной трансформации. Типичный характер распределения техногенных элементов в поверхностном слое почв и грунтов получен при обработке проб, взятых в июле 2021 г.

Производственная зона (табл. 2). Высокий уровень загрязнения отмечен в производственной зоне. Существенный диапазон значений определенных параметров объясняется разнообразием состава и генезиса субстратов, из которых осуществлялся отбор проб. Так, содержание свинца (Pb) в них варьировало от 9,5 до 152,2 мг/кг; содержание мышьяка (As) колебалось в диапазоне 11,5–41,4 мг/кг; меди (Cu) — в диапазоне 11,1–259,0 мг/кг. Таким образом, максимальные значения большинства тяжелых металлов в пробах превышали предельные

Табл. 1. Структура территории региона Налайх

Table 1. The structure of the territory of the Nalaikh region

Зона Zone	Площадь, га Area, ha	Доля в общей площади исследованной территории, % Share in the total area of the studied territory, %
Производственная зона / Industrial zone	5428,6	10,2
Селитебная зона / Residential zone	4683,9	8,8
Зона техногенных геохимических аномалий Zone of anthropogenic geochemical anomalies	33745,3	64,3
Зона, не подвергшаяся техногенной трансформации Zone not subjected to anthropogenic transformation	8888,7	16,7

Табл. 2. Содержание техногенных тяжелых металлов в почвах и поверхностных грунтах

Table 2. The content of anthropogenic heavy metals in surface soils

Основные техногенные элементы Main anthropogenic elements	Диапазон значений, мг/кг Range, mg/kg	Среднее значение, мг/кг Mean, mg/kg	Стандартные значения, мг/кг, в соответствии с ГОСТ 5850:2019 Normalized levels according to MNS 5850:2019, mg/kg		
			ПДК / MPC	ТК / TC	ОК / HC
Производственная зона / Industrial zone					
Свинец (Pb) / Lead (Pb)	9,50–152,2	64,8	100	500	1200
Мышьяк (As) / Arsenic (As)	11,5–41,4	21,9	20	50	100
Молибден (Mo) / Molybdenum (Mo)	3,83–68,1	23,1	5	20	50
Медь (Cu) / Copper (Cu)	11,1–259,0	92,2	100	500	1000
Кадмий (Cd) / Cadmium (Cd)	0,12–5,15	1,69	3	10	20
Никель (Ni) / Nickel (Ni)	9,60–178,4	59,7	150	1000	1800
Ванадий (V) / Vanadium (V)	53,4–119,2	80,1	150	600	1000
Селитебная зона / Residential zone					
Свинец (Pb) / Lead (Pb)	10,5–238,5	126,3	100	500	1200
Мышьяк (As) / Arsenic (As)	9,43–64,1	31,9	20	50	100
Молибден (Mo) / Molybdenum (Mo)	4,09–70,1	32,3	5	20	50
Медь (Cu) / Copper (Cu)	53,5–368,8	158,1	100	500	1000
Кадмий (Cd) / Cadmium (Cd)	0,12–5,44	2,39	3	10	20
Никель (Ni) / Nickel (Ni)	18,8–228,5	64,9	150	1000	1800
Ванадий (V) / Vanadium (V)	58,1–204,0	131,6	150	600	1000
Зона техногенных геохимических аномалий / Zone of anthropogenic geochemical anomalies					
Свинец (Pb) / Lead (Pb)	5,42–47,1	19,0	100	500	1200
Мышьяк (As) / Arsenic (As)	2,54–15,2	7,77	20	50	100
Молибден (Mo) / Molybdenum (Mo)	2,09–4,23	3,09	5	20	50
Медь (Cu) / Copper (Cu)	23,9–72,5	48,9	100	500	1000
Кадмий (Cd) / Cadmium (Cd)	0,11–0,89	0,38	3	10	20
Никель (Ni) / Nickel (Ni)	18,6–48,0	33,2	150	1000	1800
Ванадий (V) / Vanadium (V)	12,0–77,0	35,5	150	600	1000
Зона, не подвергшаяся техногенной трансформации / Zone not subjected to anthropogenic transformation					
Свинец (Pb) / Lead (Pb)	2,13–12,7	6,83	100	500	1200
Мышьяк (As) / Arsenic (As)	1,88–6,53	3,12	20	50	100
Молибден (Mo) / Molybdenum (Mo)	2,00–2,59	2,25	5	20	50
Медь (Cu) / Copper (Cu)	20,5–34,5	26,9	100	500	1000
Кадмий (Cd) / Cadmium (Cd)	0,12–0,35	0,19	3	10	20
Никель (Ni) / Nickel (Ni)	20,4–28,4	22,7	150	1000	1800
Ванадий (V) / Vanadium (V)	9,08–35,0	23,4	150	600	1000

Примечание: ПДК — предельно допустимая концентрация; ТК — токсичная концентрация;

ОК — опасная концентрация.

Note: MPC — maximum permissible concentration; TC — toxic concentration; HC — hazardous concentration.

концентрации, установленные государственным стандартом Монголии MNS 5850:2019. Наиболее высокие значения отмечались в грунтах, в которых присутствовала угольная крошка и пыль. Подобные грунты характерны не только для поверхности планированных отвалов выведенного из эксплуатации государственного угледобывающего предприятия, но и для выработок частных компаний.

Селитебная зона. Часть жилых объектов г. Налайх также возведена на отвалах угольных шахт (после их вертикальной планировки). Кроме того, в грунтах селитебной зоны нередко присутствует большое количество угольной золы, в которой содержание металлов обычно в несколько раз выше, чем в угле, из которого она образовалась. Этим, по-видимому, объясняется максимальный уровень загрязнения грунтов, отмеченный в ряде проб из селитебной зоны.

Зона техногенных геохимических аномалий. В ряде проб поверхностного слоя почвы, отобранных за пределами производственной и селитебной зон, содержание техногенных элементов превышало их фоновый уровень, характерный для данного региона [21]. Хотя распределение подобных участков носило мозаичный характер, в целом они формировали зону геохимических аномалий, практически окружающую район добычи угля. По мере удаления от него наблюдались две тенденции: количество проб с повышенным содержанием тяжелых металлов закономерно уменьшалось; снижался уровень превышения фонового содержания этих элементов. То есть техногенные геохимические аномалии отмечались реже и становились менее выраженными.

Анализ материалов, характеризующих содержание техногенных элементов в подземных водах, показывает, что они максимально загрязнены на территории производственной зоны. Так, содержание меди в них достигало 2,22 мг/л (при ПДК 1,0); свинца — 0,13 мг/л (при ПДК 0,05), мышьяка — 0,06 (при ПДК 0,01).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщенный анализ результатов проведенных исследований свидетельствует о том, что ряд участков территории региона Налайх подвергся глубокой техногенной трансформации. Данный процесс происходил как в период работы государственного угледобывающего предприятия, так и после его закрытия. При этом на последнем этапе он отличался многообразием форм негативного воздействия на окружающую среду и практически отсутствием учета их последствий. Произошло не только загрязнение многих участков, но и сформировались условия для развития на них опасных геологических процессов и явлений. В частности, это возможные обрушения незарегистрированных подземных гор-

ных выработок и сопутствующие им проседания земной поверхности.

Как показали итоги кластерного анализа, техногенные геохимические аномалии, возникшие в местах накопления устойчивых загрязнителей (Pb, As и пр.), обнаружены на расстоянии нескольких километров от участков, где производилась добыча угля, в результате которой они распространились на земной поверхности. Большинство из них расположены по направлению преобладающих в данном районе ветров. Можно предположить, что основным путем распространения загрязнителей является дефляция отвалов шахт.

Загрязнение подземных вод носит локальный характер. Техногенные загрязнители накапливаются в них главным образом непосредственно под участками сильно загрязненных поверхностных грунтов производственной зоны. В точках разгрузки этих подземных вод могут возникнуть пятна загрязнения. Использование в технических целях загрязненных подземных вод нежелательно.

Таким образом, реновация региона Налайх требует принципиального улучшения геоэкологических условий данной территории. Существующий план реновации предусматривает лишь вертикальную планировку территории — выравнивание площадок для строительства объектов. Подобный подход обусловлен необходимостью в кратчайшие сроки решить острую социально-экономическую проблему — обеспечить занятость населения этого района Монголии, что позволит значительно повысить его благосостояние. Проектируемый технологический парк представляет собой огромный производственный комплекс, в котором на площади 120 га будут построены 50 заводов по производству строительных материалов, 10 заводов по производству стекла, а также предприятия по переработке овечьей шерсти. Вместе с тем можно обосновано прогнозировать, что без превентивного решения геоэкологических проблем строительство и последующая эксплуатация этих объектов могут столкнуться с рядом проблем, решение которых после начала возведения ОКС потребует значительно больших финансовых затрат. Например, это развитие опасных геологических процессов на участках неучтенных подземных горных выработок. Загрязнение воздушной среды тяжелыми металлами в результате дефляции грунтов на окружающей территории может создать серьезные затруднения в плане экологической чистоты продукции предприятий технопарка. В настоящее время это становится все более значимым фактором конкурентоспособности изделий, который в полной мере учитывается как в сфере производства строительных материалов, так и при изготовлении изделий из овечьей шерсти.

На основании изложенных в статье материалов разработчикам программы реновации региона Налайх следует дать следующие рекомендации:

- провести тщательный учет частных горных выработок и осуществить работы по их ликвидации, исключающие развитие опасных геологических процессов и явлений при возведении на данных участках ОКС;

- ликвидировать техногенные геохимические аномалии, дефляция которых может являться источником загрязнения атмосферного воздуха;

- запретить использование загрязненных подземных вод, в том числе из уже пробуренных скважин, в период строительства сооружений технопарка и в ходе их последующей эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Inizan G., Suslova O. Comparative perspective on legal geography of demolition in urban renovation. A French-Russian approach // *Urban Studies and Practices*. 2022. Vol. 7. Issue 3. Pp. 47–64. DOI: 10.17323/usp73202247-64

2. Shahraki A.A. Renovation programs in old and inefficient neighborhoods of cities with case studies // *City, Territory and Architecture*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1186/s40410-022-00174-1

3. Huang W., Hu L., Xing Y. Sustainable renewal strategies for older communities from the perspective of living experience // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 5. P. 2813. DOI: 10.3390/su14052813

4. Суздалева А.Л., Жаргалсайхан Б., Сметанин И.А. Опасные экзодинамические процессы в техногенных геологических телах // *Естественные и технические науки*. 2021. № 5 (156). С. 170–171. DOI: 10.25633/ETN.2021.05.12

5. Суздалева А.Л. Вторая геология — наука о техногенных телах литосферы : монография. М. : РадиоСофт, 2022. 583 с.

6. Северилова П.В., Тищенко Р.В. Теоретические аспекты реновации старопромышленных районов Донбасса // *Гуманитарные науки : сб. науч. тр. IV Республиканской конф. молодых ученых, аспирантов, студентов. Макеевка*, 2018. С. 43–47.

7. Бондарчук В.В., Глушкина И.К. Актуальность реновации недействующих угольных шахт на примере Донбасского региона // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2019. № 15 (58). С. 51–60.

8. Cacciuttolo C., Cano D. Environmental impact assessment of mine tailings spill considering metallurgical processes of gold and copper mining: case studies in the Andean countries of Chile and Peru // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 3057. DOI: 10.3390/w14193057

9. Энхтур Л. История развития горного дела в Монголии и сегодняшний уровень горных предприятий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 1. С. 419–423.

10. Baatarzorig T., Galindev R., Maisonnave H. Effects of ups and downs of the Mongolian mining sector // *Environment and Development Economics*. 2018. Vol. 23. Issue 5. Pp. 527–542. DOI: 10.1017/S1355770X18000153

11. Нямдорж Н. Архитектура Улан-Батора (Монголия): актуальные проблемы городской среды // *Наука России: цели и задачи : сб. науч. тр. по мат. XXV Междунар. науч. конф. Екатеринбург*, 2021. С. 107–112. DOI: 10.18411/sr-10-02-2021-24

12. Суздалева А.Л., Жаргалсайхан Б. Комплексное решение проблем экологической безопасности и охраны труда при рекультивации угольных месторождений в районе Налайх (Монголия) // *Естественные и технические науки*. 2020. № 7 (145). С. 105–106. DOI: 10.25633/ETN.2020.07.10

13. Huang Y., Liu J., Wang G., Bi X., Sun G., Wu X. et al. Concentrations, speciation, and potential release of hazardous heavy metals from the solid combustion residues of coal-fired power plants // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Issue 19. P. 12617. DOI: 10.3390/ijerph191912617

14. Wang L., Tao Y., Su B., Wang L., Liu P. Environmental and health risks posed by heavy metal contamination of groundwater in the Sunan Coal Mine, China // *Toxics*. 2022. Vol. 10. Issue 7. P. 390. DOI: 10.3390/toxics10070390

15. Okeme I.C., Crane R.A., Nashbc W.M., Ojonimid T.I., Scott T.B. Characterisation of rare earth elements and toxic heavy metals in coal and coal fly ash // *RSC Adv*. 2022. Vol. 12. Issue 30. Pp. 19284–19296. DOI: 10.1039/d2ra02788g

16. Moldovan M., Krupp E.M., Holliday A.E., Donard O.F.X. High resolution sector field ICP-MS and multicollector ICP-MS as tools for trace metal speciation in environmental studies: a review // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2004. Vol. 19. Issue 7. Pp. 815–822. DOI: 10.1039/b403128h

17. Bacon J.R., Butler O.T., Cairns W.R.L., Cavoura O., Cook J.M., Davidson C.M. et al. Atomic spectrometry update — a review of advances in environmental analysis // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2022. Vol. 37. Pp. 9–49. DOI: 10.1039/D1JA90054D

18. Habib M.A., Basuki T., Miyashita S., Bekelesi W., Nakashima S., Techato K. et al. Assessment of natural radioactivity in coals and coal combustion residues from a coal-based thermoelectric plant in Ban-

gladesh: implications for radiological health hazards // *Environ Monit Assess.* 2019. Vol. 191. Issue 1. P. 27. DOI: 10.1007/s10661-018-7160-y

19. Буреева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA». Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2007. 112 с.

20. Сагд Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л. и др. Геохимия окружающей среды. М. : Недра, 1990. 335 с.

21. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Бажа С.Н., Гунин П.Д., Голованов Д.Л., Ямнова И.А. и др. Загрязнение почв тяжелыми металлами в промышленных городах Монголии // *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* 2010. № 3. С. 20–27.

Поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Антонина Львовна Суздалева** — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 70718, Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967; SuzdalevaAL@yandex.ru;

Михаил Юрьевич Слесарев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru;

Болортуяа Жаргалсайхан — аспирант кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1064152; jargalsaihanbolortuya@gmail.com.

Вклад авторов:

Суздалева А.Л. — научное руководство, концепция исследования, структурирование методологии, подготовка итоговых выводов.

Слесарев М.Ю. — анализ материалов, подготовка итоговых выводов.

Жаргалсайхан Б. — сбор исходных данных для написания научной работы, формирование структуры статьи согласно шаблону, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Inizan G., Suslova O. Comparative perspective on legal geography of demolition in urban renovation. A French-Russian approach. *Urban Studies and Practices.* 2022; 7(3):47-64. DOI: 10.17323/usp73202247-64

2. Shahraki A.A. Renovation programs in old and inefficient neighborhoods of cities with case studies. *City, Territory and Architecture.* 2022; 9. DOI: 10.1186/s40410-022-00174-1

3. Huang W., Hu L., Xing Y. Sustainable renewal strategies for older communities from the perspective of living experience. *Sustainability.* 2022; 14(5):2813. DOI: 10.3390/su14052813

4. Suzdaleva A.L., Jargalsaihan B., Smetanin I.A. Dangerous exogenous geodynamic processes in technogenic geological bodies. *Natural and Technical Sciences.* 2021; 5(156):170-171. DOI: 10.25633/ETN.2021.05.12 (rus.).

5. Suzdaleva A.L. *Second geology — science about technogenic bodies of the lithosphere (monograph).* Moscow, RadioSoft, 2022; 584. (rus.).

6. Severilova P.V., Tishchenko R.V. Theoretical aspects of renovation of old industrial districts of Don-

bass. *Humanities: a collection of scientific papers of the IV Republican Conference of Young Scientists, Post-graduates, Students.* Makeyevka, 2018; 43-47. (rus.).

7. Bondarchuk V.V., Glushkina I.K. Relevance of renovation of non-operating coal mines on the example of the Donbass region. *Electronic Institutional Repository Donbas State Technical Institute.* 2019; 15(58):51-60. (rus.).

8. Cacciuttolo C., Cano D. Environmental impact assessment of mine tailings spill considering metallurgical processes of gold and copper mining: case studies in the Andean countries of Chile and Peru. *Water.* 2022; 14:3057. DOI: 10.3390/w14193057

9. Enkhur L. The history and current state of mining in Mongolia. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2017; 1:419-423 (rus.).

10. Baatarzorig T., Galindev R., Maisonnave H. Effects of ups and downs of the Mongolian mining sector. *Environment and Development Economics.* 2018; 23(5):527-542. DOI: 10.1017/S1355770X18000153

11. Nyamdorzh N. Architecture of Ulaanbaatar (Mongolia): actual problems of the urban environment.

Science of Russia: goals and objectives : proceedings of the XXVth International Scientific Conference. Ekaterinburg, 2021; 107-112. DOI: 10.18411/sr-10-02-2021-24 (rus.).

12. Suzdaleva A.L., Jargalsaihan B. Comprehensive solution of ecological safety and labor protection problems in recultivation of coal fields in Nalaikh district (Mongolia). *Natural and Technical Sciences.* 2020; 7(145):105-106. DOI: 10.25633/ETN.2020.07.10 (rus.).

13. Huang Y., Liu J., Wang G., Bi X., Sun G., Wu X. et al. Concentrations, speciation, and potential release of hazardous heavy metals from the solid combustion residues of coal-fired power plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2022; 19(19):12617. DOI: 10.3390/ijerph191912617

14. Wang L., Tao Y., Su B., Wang L., Liu P. Environmental and health risks posed by heavy metal contamination of groundwater in the Sunan coal mine, China. *Toxics.* 2022; 10(7):390. DOI: 10.3390/toxics10070390

15. Okeme I.C., Crane R.A., Nashbc W.M., Ojonimid T.I., Scott T.B. Characterisation of rare earth elements and toxic heavy metals in coal and coal fly ash. *RSC Adv.* 2022; 12(30):19284-19296. DOI: 10.1039/d2ra02788g

16. Moldovan M., Krupp E.M., Holliday A.E., Donard O.F.X. High resolution sector field ICP-MS

and multicollector ICP-MS as tools for trace metal speciation in environmental studies : a review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry.* 2004; 19(7):815-822. DOI: 10.1039/b403128h

17. Bacon J.R., Butler O.T., Cairns W.R.L., Cavoura O., Cook J.M., Davidson C.M. et al. Atomic spectrometry update — a review of advances in environmental analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry.* 2022; 37:9-49. DOI: 10.1039/D1JA90054D

18. Habib M.A., Basuki T., Miyashita S., Bekelesi W., Nakashima S., Techato K. et al. Assessment of natural radioactivity in coals and coal combustion residues from a coal-based thermoelectric plant in Bangladesh: implications for radiological health hazards. *Environ Monit Assess.* 2019; 191(1):27. DOI: 10.1007/s10661-018-7160-y

19. Bureeva N.N. *Multivariate statistical analysis using the STATISTICA software package.* Nizhny Novgorod, NNUP, 2007; 112. (rus.).

20. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L. et al. *Geochemistry of the environment.* Moscow, Nedra, 1990; 335. (rus.).

21. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Bazha S.N., Gunin P.D., Golovanov D.L., Yamnova I.A. et al. Contamination of soils with heavy metals in the industrial centers of Mongolia. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography.* 2010; 3:20-27. (rus.).

Received February 15, 2023.

Adopted in revised form on February 28, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

Bionotes: **Antonina L. Suzdaleva** — Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 70718, Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967; SuzdalevaAL@yandex.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru;

Bolortuya Jargalsaihan — postgraduate student of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1032608; jargalsaihanbolortuya@gmail.com.

Contribution of the authors:

Antonina L. Suzdaleva — scientific guidance, research concept, structuring methodology, preparation of final conclusions.

Mikhail Yu. Slesarev — analysis of materials and preparation of final conclusions.

Bolortuya Jargalsaihan — collection of initial data for writing a scientific work, formation of the structure of the article according to the template, text revision.

The authors declare no conflict of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.22:627.52

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.615-626

Численное моделирование дифракции морских волн со случайными фазами на оградительных сооружениях

Александр Григорьевич Гогин, Измаил Григорьевич Кантаржи

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается взаимодействие морских гравитационных волн с оградительными сооружениями морского порта методом численного моделирования с помощью современных численных волновых моделей. Исследуется предсказательная способность некоторых распространенных моделей применительно к дифракции морских волн со случайными фазами в сравнении с известными аналитическими методами и экспериментальными данными.

Материалы и методы. Численное моделирование выполняется с применением современных численных волновых моделей, реализованных в программном комплексе DHI MIKE 21. Используются спектральная волновая модель с функцией коррекции дифракции волн на мелководье и фазоразрешающая волновая модель, основанная на уравнениях Буссинеска.

Результаты. Для всех моделей получено распределение коэффициентов дифракции за оградительными сооружениями условной портовой акватории. В результате сравнения установлено, что модели нерегулярных волн (волн со случайными фазами) лучше распределяют волновую энергию за оградительными сооружениями по сравнению с моделями регулярных (монохромных) волн. Отмечается, что вид частотного распределения случайных волн практически не влияет на коэффициенты дифракции на акватории, а угловое распределение, напротив, влияет значительно.

Выводы. Численной волновой моделью с наилучшей предсказательной способностью определена волновая модель, основанная на уравнениях Буссинеска, в приближении нерегулярных волн. Спектральная волновая модель с функцией коррекции дифракции, менее требовательная к мощности компьютера, также позволила получить близкие к эталонным результаты. Подтверждено, что моделирование распространения морских волн в регулярном режиме может дать некорректные результаты на тех акваториях морских портов, где сильны эффекты дифракции волн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, DHI MIKE 21, дифракция волн, морские волны, ветровые волны, оградительные сооружения, верификация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гогин А.Г., Кантаржи И.Г. Численное моделирование дифракции морских волн со случайными фазами на оградительных сооружениях // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 615–626. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.615-626

Автор, ответственный за переписку: Александр Григорьевич Гогин, alex.gogin@bk.ru.

Numerical simulation of sea-wave diffraction with random phases on breakwaters

Aleksandr G. Gogin, Izmail G. Kantarzhi

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

ABSTRACT

Introduction. Numerical simulation of sea gravity waves interaction with seaport barriers using modern numerical wave models is considered. The predictive power of some commonly used models is examined in relation to the diffraction of sea waves with a random phase in comparison with known analytical methods and experimental data.

Materials and methods. Numerical simulation is carried out using modern numerical wave models implemented in the DHI MIKE 21 software package. A spectral wave model with a function for correcting wave diffraction in shallow water and a phase-resolving wave model based on the Boussinesq equations are used.

Results. Distribution of diffraction coefficients behind the breakwaters of the conventional port water area has been obtained for all models. As a result of the comparison, it was found that models of irregular waves (waves with random phases) have better wave energy distribution behind the breakwaters as compared to regular (monochromatic) wave models. It is noted that the type of frequency distribution of random waves has almost no effect on the diffraction coefficients of the water area, while the angular distribution, on the contrary, has a significant effect.

Conclusions. The wave model based on the Boussinesq equations in the irregular wave approximation is determined as the numerical wave model with the best predictive ability. The spectral wave model with diffraction correction function, which is less demanding on computer power, also made it possible to obtain results close to the reference ones. It is confirmed that regular wave propagation modelling of sea waves can give incorrect results in those seaport water areas where wave diffraction effects are strong.

KEYWORDS: numerical simulation, DHI MIKE 21, wave diffraction, sea waves, wind waves, breakwaters, verification

FOR CITATION: Gogin A.G., Kantarzi I.G. Numerical simulation of sea-wave diffraction with random phases on breakwaters. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):615-626. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.615-626 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr G. Gogin, alex.gogin@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция морских волн — огибание волнами препятствий — наблюдается практически в каждом порту на оградительных сооружениях, которые защищают порт от негативного воздействия гидрометеорологических явлений. Методам расчета и прогнозирования дифракции поля ветровых волн в разное время уделялось много внимания. Было разработано несколько аналитических методов расчета высот волн на акватории порта: метод диффузии волновой амплитуды (метод параболического уравнения), основанный на исследованиях дифракции электромагнитных волн [1]; метод баланса волновой энергии [2]; методы, базирующиеся на уравнениях пологих склонов [3, 4]. Обширный обзор математических моделей, основанных на уравнениях пологих склонов, представлен в работе [5].

Эти методы рассматривают как дифракцию монохромных (регулярных) волн, так и дифракцию волн со случайными фазами (нерегулярными). Многочисленные исследования показывают, что использование разнонаправленных нерегулярных волн дает лучшее совпадение между рассчитанными и измеренными высотами волн за оградительными сооружениями. А волновые модели с регулярными волнами или однонаправленными нерегулярными волнами хуже прогнозируют дифракцию волн за сооружениями [6, 7].

С развитием численных волновых моделей, работающих в приближении регулярных волн, для решения задачи дифракции нерегулярных волн использовались методы разложения поля нерегулярных волн на отдельные компоненты-гармоники с последующим отдельным расчетом трансформации каждой компоненты. Результаты отдельных расчетов методом суперпозиции накладывались друг на друга для получения итоговой картины распределения высот волн [8–10]. Этот подход позволяет получить достоверную картину дифракции нерегулярных волн с помощью регулярных волновых моделей [11].

Для решения задачи дифракции волн вокруг сооружений сегодня активно применяются фазоразрешающие волновые модели, основанные на уравнениях Буссинеска [12, 13]. Они в большинстве своем могут учитывать нелинейное взаимодействие

волн между собой, но требуют достаточно мелкой дискретизации расчетной области, что делает их непригодными для использования на больших расчетных акваториях.

Спектральные волновые модели традиционно используются для определения параметров ветроволнового режима на глубокой воде и на обширной акватории [10, 14]. Они учитывают все особенности генерации волн, их распространения и диссипации, за исключением дифракции волн. Однако не так давно в спектральные модели была введена относительно новая функция коррекции дифракции/рефракции волн на мелководье, основанная на уравнениях пологих склонов [15] и реализованная в том числе в спектральной волновой модели в программном комплексе (ПК) DHI MIKE 21 SW. Это сделало возможным использование этой и подобных спектральных моделей для исследований дифракции поля нерегулярных волн на портовых акваториях.

Таким образом, численные волновые модели непрерывно развиваются. Большое количество исследований проводилось в части предсказательной способности отдельных моделей [16–19]. В настоящее время с развитием и растущей доступностью вычислительной техники подход к этим расчетам, их верификация и точность представляют большой интерес. В особенности в части спектрального подхода. Основная цель данной работы — проанализировать возможности и границы применимости численных волновых моделей, реализованных в ПК DHI MIKE 21: спектральной волновой модели (Spectral Waves — SW) и волновой модели, основанной на уравнениях Буссинеска (Boussinesq Waves — BW). Проведено сравнение результатов расчета дифракции волн на оградительных сооружениях порта с активированной функцией коррекции в спектральной волновой модели и без нее, а также сравнение с результатами, полученными на волновой модели Буссинеска. Численный эксперимент включал четыре волновые модели Буссинеска, отличающиеся видом генерации подходящих волн. Так, с помощью волновой модели Буссинеска исследовалась дифракция регулярных, нерегулярных однонаправленных и нерегулярных разнонаправленных волн. Приведено сравнение получаемых на численных моделях результатов с известными аналитическими методами и экспериментальными данными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численные волновые модели, реализованные в ПК DHI MIKE 21

Для проведения исследования были использованы две численные модели MIKE 21: спектральная волновая модель SW и волновая модель, основанная на уравнениях Буссинеска, BW. Подробнее рассмотрим относительно новую функцию коррекции дифракции/рефракции волн на мелководье, введенную в спектральную волновую модель [15]. Корректировка дифракции выводится из уравнения пологих склонов [3]:

$$\nabla c c_g \nabla \xi + \kappa^2 c c_g \xi = 0, \quad (1)$$

где $\xi = a \exp(i\psi)$ — комплексная волновая функция; $c = \omega/k$ и $c_g = \partial\omega/\partial k$, а также параметр распределения κ определяются из дисперсионного соотношения:

$$\omega^2 = g \kappa \tanh(\kappa d), \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; d — глубина воды. В отсутствии дифракции c и c_g — фазовая и групповая скорость соответственно, а κ равно волновому числу k (величине пространственного градиента фазовой функции ψ): $\kappa = k = |\nabla\psi|$. Умножая уравнение пологих склонов (1) на комплексную функцию ξ , а затем взяв мнимую часть, получим уравнение баланса энергии, которое для постоянной частоты ω (основное допущение для уравнения пологих склонов) сводится к:

$$\nabla \left[\frac{k}{\kappa} c_g a^2 \right] = 0. \quad (3)$$

Это уравнение баланса энергии показывает, что при учете дифракции скорость распространения энергии в пространстве составит:

$$C_g = \frac{k}{\kappa} c_g. \quad (4)$$

Подставляя волновую функцию в уравнение пологих склонов, легко продемонстрировать, что величина градиента фазовой функции при наличии дифракции определяется выражением:

$$k^2 = \kappa^2 + \frac{\nabla(cc_g \nabla a)}{cc_g a}. \quad (5)$$

Если пренебречь дифракцией (т.е. изменение амплитуды колебаний принимается равным нулю), то второй член в правой части уравнения (5) обращается в нуль, и это уравнение сводится к $k = \kappa$. Таким образом, второй член представляет дифракцию в фазовой функции ψ . Обозначив дифракционный параметр как δ_a , отдельно запишем выражение для него:

$$\delta_a = \frac{\nabla(cc_g \nabla a)}{\kappa^2 cc_g a}. \quad (6)$$

Тогда скорректированная фазовая скорость запишется в следующем виде:

$$C = \omega / k = c(1 + \delta_a)^{-1/2}. \quad (7)$$

а скорректированная групповая скорость:

$$C_g = c_g(1 + \delta_a)^{1/2}. \quad (8)$$

В отсутствие дифракции и течений уравнение баланса энергии, которое является основным уравнением спектральных волновых моделей, имеет вид [20]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial c_x E}{\partial x} + \frac{\partial c_y E}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta E}{\partial \theta} = S, \quad (9)$$

где $E = E(\omega, \theta)$ — плотность энергии волн как функция от частоты ω и направления распространения θ . Генерация, диссипация и волновое взаимодействие представлены функцией источника $S = S(\omega, \theta)$. Первый член левой части представляет собой скорость изменения плотности энергии во времени; второй и третий члены — распространение энергии в горизонтальной плоскости. Четвертый член — это распространение энергии в пространстве спектральных направлений (рефракция). Скорости распространения c_x, c_y представляют собой x -, y -компоненты групповой скорости c_g соответственно, а c_θ — скорость направленного поворота (скорость распространения в θ (угловых) координатах). Эти скорости распространения взяты из линейной теории поверхностных гравитационных волн без эффектов дифракции. Чтобы учесть дифракцию, рассмотрим скорость поворота волны c_θ (скорость изменения направления отдельной компоненты-волны, когда она движется вдоль волнового луча). Ее легко выразить через пространственную скорость поворота $\partial\theta/\partial s$, т.е. когда энергия волны распространяется вдоль волнового луча на расстояние ∂s за интервал времени ∂t , она поворачивается на угол $\partial\theta$. Тогда пространственная скорость поворота составит $\Delta\theta/\Delta s$. Поскольку расстояние можно выразить $\Delta s = c_g \Delta t$, то скорость поворота составит $\Delta\theta/\Delta t = c_g \Delta\theta/\Delta s$. Взяв бесконечно малые пределы, обозначив временную скорость поворота как c_θ , получим:

$$c_\theta = c_g \frac{\partial\theta}{\partial s} = c_g \left(\frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial m} \right), \quad (10)$$

где m — координата, ориентированная вдоль гребня волны (по изолинии фазы).

Добавление дифракции к уравнению баланса энергии включает только замену c_g на C_g и c_θ на C_θ в уравнении спектрального баланса (9):

$$C_\theta = C_g \frac{\partial\theta}{\partial s} = C_g \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial k}{\partial m} + \frac{1}{2(1 + \delta_a)} \frac{\partial \delta_a}{\partial m} \right). \quad (11)$$

Эти выражения для C_g и C_θ сформулированы в терминах дифракционного параметра δ_a , который выражается через амплитуду волны, а не через спектральную плотность $E(\omega, \theta)$. Вывод дифракционного параметра в терминах $E(\omega, \theta)$ на данный момент неизвестен, но возможна замена произво-

дных от амплитуды a в этих выражениях на корень из плотности энергии. Таким образом, выражение для дифракционного параметра для ввода в уравнение спектральной плотности (9) примет вид:

$$\delta_E = \frac{\nabla(cc_g \nabla \sqrt{E})}{\kappa^2 cc_g \sqrt{E}}. \quad (12)$$

В численной реализации параметр дифракции δ_E аппроксимируется по центральной схеме второго порядка на основе результатов предыдущих итераций. Чтобы ускорить сходимость, для расчета дифракционного параметра используется спектральная плотность, интегрированная только по направлению. В численную структуру модели вводится также сглаживающий фильтр для расчета градиентов при оценке параметра дифракции, чтобы сгладить волновое поле и избежать возможных неустойчивостей:

$$E_{i,j}^n = E_{i,j}^{n-1} - 0,2 \left[\frac{E_{i-1,j} + E_{i,j-1} - 4E_{i,j} + E_{i+1,j} + E_{i,j+1}}{2} \right]^{n-1}, \quad (13)$$

где i, j — шаг сетки в соответствующем направлении; n — номер итерации. В работе [15] авторы пришли к выводу, что число итераций должно быть не менее шести при использовании сетки с разрешением $1/5-1/10$ от длины волны, чтобы достичь численной устойчивости модели.

Генерация подходящих волн

Задача дифракции волн исследуется на волновых моделях с различным способом задания подходящих волн: регулярного характера (монохромные) и случайного (нерегулярного) характера (спектр). В прикладных исследованиях степени защищенности закрытой акватории от коротких волн чаще всего используется либо аппроксимирующий спектр Пирсона – Московича, либо модифицирующий его спектр JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), если нет иной информации о типе частотного спектра на конкретной акватории. Спектр JONSWAP развивает спектр Пирсона – Московича по данным обширных натурных исследований спектров волнения в северных морях. Общий вид можно записать следующим образом [21]:

$$S_{JS}(\omega) = F_n S_{PM}(\omega) \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_{\max})^2}{2\sigma^2 \omega_{\max}^2} \right], \quad (14)$$

где γ — параметр пиковатости; σ — параметр формы, равный:

$$\begin{cases} \sigma = 0,07 & \text{для } \omega \leq \omega_{\max}, \\ \sigma = 0,09 & \text{для } \omega > \omega_{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

Большое значение имеет также угловой спектр волнового поля. Если по исследуемому объекту нет информации о типе распределения волн по направлениям, то наиболее часто принимается распределение типа $\cos^n$:

$$D(\theta) = \cos^n(\theta - \theta_m), \quad (16)$$

где θ_m — основное направление распространения волн; $(\theta - \theta_m) = \Delta\theta_{\max}$ — максимальное отклонение от основного направления распространения волн. Индекс углового распределения n обычно принимается равным от 2 до 4 для ветровых волн и больше 10 для волн зыби.

Аналитические и экспериментальные данные

Сравнение результатов, получаемых на численных моделях, будет проводиться с экспериментальными данными В.К. Завьялова [22] и аналитическим решением, полученным Ю.М. Крыловым с помощью улучшенного уравнения баланса волновой энергии для двух прямолинейных сходящихся волноломов [23]. В работе [23] также приведено сравнение с результатами расчета по нормативной методике, вошедшей в СНиП 2.06.04–82 и перешедшей в современный СП 38.13330. Нормативная методика основана на анализе большого объема экспериментальных данных о ветровом волнении, откуда были получены эмпирические зависимости элементов ветровых волн от основных волнообразующих факторов. Эти зависимости впоследствии вошли в нормативы в графическом виде. На рис. 1 представлено сопоставление коэффициентов дифракции, полученных вышеперечисленными методами.

В труде [23] отмечается, что экспериментальные коэффициенты дифракции обычно меньше предсказываемых теорией на 20 % в зоне света и больше таковых в зоне тени, что свидетельствует о более активном растекании энергии волн в зоны с меньшей ее плотностью, чем это предсказывают линейные решения задачи дифракции. Улучшенное авторами [23] уравнение баланса энергии для задачи дифракции позволило получить более точное решение, что видно из сравнения результатов с экспериментальными данными, а также с данными, полученными по нормативной методике. Различия между результатами находятся в пределах 10–15 %.

Это в свою очередь позволяет принять указанные результаты в качестве эталона для сравнения с результатами, получаемыми на численных моделях в настоящей работе. В представленных далее картинах распределения высот волн за оградительными сооружениями для сопоставления даны изолинии, полученные по методу баланса волновой энергии (сплошные линии на рис. 1).

Численная модель

Рассмотрена условная консервативная модель: два сходящихся оградительных сооружения, расположенные на плоском дне глубиной 12 м. Таким образом, дифракция волн является определяющей для картины эволюции волнового поля за сооружениями. Ширина модели равна длине модели и со-

составляет 15 длин волн. Оградительные сооружения расположены на расстоянии 3,5 длины волн от линии генерации волн. Расстояние между головами оградительных сооружений составляет 3 длины волн. Схематичное представление модели показано на рис. 2.

На боковых границах модели установлен поглощающий слой, который гасит выходящие из модели волны. Оградительные сооружения представляют собой вертикальную стенку с частичным слабым отражением подходящих волн. Коэффициент отражения составляет $k_{ref} = 0,1$.

Регулярные и нерегулярные пологие волны малой амплитуды, нормальные ($\theta_m = 90^\circ$ на рис. 3) по главному направлению распространения к оси оградительных сооружений генерируются недалеко от левой границы модели. Регулярные волны генерируются с постоянной высотой $h = 1,8$ м; нерегулярные — со значительной высотой волны $h_{13\%} = 1,8$ м. Период волн T для регулярных и пиковый период T_p для нерегулярных выбирались исходя из равенства длин волн во всех моделях. Для моделей со случайно генерируемым волновым полем принимается максимальное отклонение от основ-

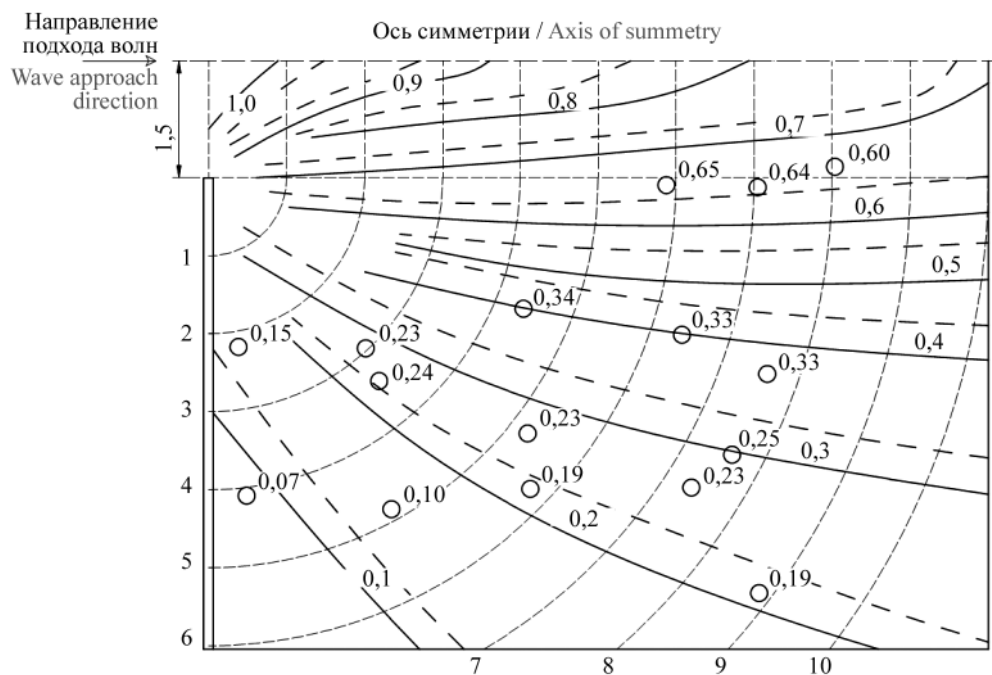


Рис. 1. Изолинии коэффициента дифракции за сходящимися оградительными сооружениями, полученные по методу баланса волновой энергии (сплошные линии) [23] и по нормативной методике (пунктирные линии). Точки и значения около них — экспериментальные данные В.К. Завьялова [22]

Fig. 1. Isolines of diffraction coefficient behind breakwaters obtained by wave energy balance method (solid lines) [23] and by normative method (dashed lines). Points and values near them are the experimental data obtained V.K. Zavyalov [22]

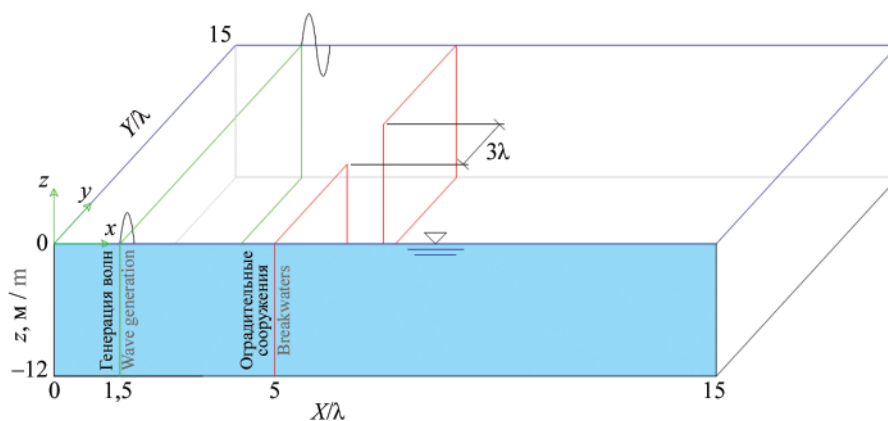


Рис. 2. Схематичное представление модели

Fig. 2. Schematic representation of the model

ного направления распространения волн $\Delta\theta_{\max} = 30^\circ$ с двумя полярными индексами распределения: $n = 2$ и $n = 20$ (условные границы наиболее часто используемого диапазона значений индекса). Номенклатура моделей представлена в табл. 1.

В модели также было введено 17 контрольных точек выдачи результатов. Их плановое расположение показано на рис. 3. Сравнение результатов моделирования с данными аналитического решения и экспериментов проводилось по получаемым значениям в этих точках.

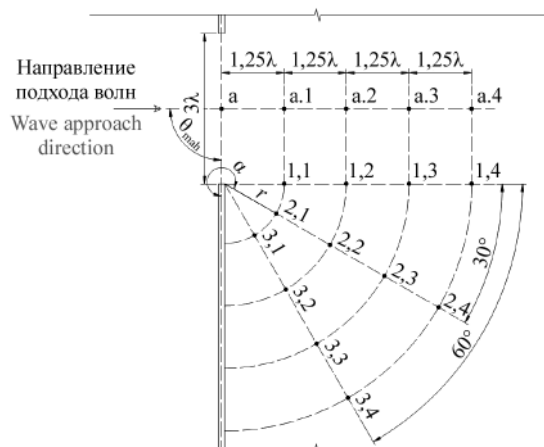


Рис. 3. Расположение контрольных точек выдачи результатов

Fig. 3. Location of design points for issuing results

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех моделей было получено распределение коэффициентов дифракции на всей акватории и в контрольных точках. Коэффициент дифракции определялся как отношение высоты волн в точке к высоте генерируемых волн. Для модели с регулярным волнением:

$$k_d = \frac{h_i}{h_0}, \quad (17)$$

где h_i — высота волн в точке; h_0 — высота генерируемых волн.

Для моделей с нерегулярным волнением:

$$k_{d,13\%} = \frac{h_{i,13\%}}{h_{0,13\%}}, \quad (18)$$

где $h_{i,13\%}$ — значительная высота волн в точке; $h_{0,13\%}$ — значительная высота генерируемых волн.

Такой подход дал возможность представить дифракционные диаграммы в наглядном привычном виде, а также визуально сравнить их с результатами, принятыми выше в качестве эталонных.

Полученные значения коэффициентов дифракции в 17 контрольных точках позволили количественно сравнивать дифракционные диаграммы разных моделей на огражденной акватории с данными исследований [23] и между собой. Для сравнения использовалось среднеквадратическое отклонение (СКО) в формулировке, предложенной в работе [24]:

Табл. 1. Номенклатура используемых численных моделей

Table 1. Nomenclature of used numerical models

Обозначение Sign	Вид модели Model type	Вид генерируемых волн Type of generated waves
Сп20 ⁻ Sp20 ⁻	Спектральная волновая модель без коррекции дифракции	Нерегулярные с индексом распределения $n = 20$ Irregular with distribution index $n = 20$
Сп2 ⁻ Sp2 ⁻	Spectral wave model without diffraction correction	Нерегулярные с индексом распределения $n = 2$ Irregular with distribution index $n = 2$
Сп20 ⁺ Sp20 ⁺	Спектральная волновая модель с коррекцией дифракции	Нерегулярные с индексом распределения $n = 20$ Irregular with distribution index $n = 20$
Сп2 ⁺ Sp2 ⁺	Spectral wave model with diffraction correction	Нерегулярные с индексом распределения $n = 2$ Irregular with distribution index $n = 2$
Б / В	Волновая модель Буссинеска Boussinesq wave model	Регулярные / Regular
Б0 B0		Нерегулярные однонаправленные Irregular unidirectional
Б20 B20		Нерегулярные с индексом распределения $n = 20$ Irregular with distribution index $n = 20$
Б2 B2		Нерегулярные с индексом распределения $n = 2$ Irregular with distribution index $n = 2$

Примечание: Сп и Б — спектральная и модель Буссинеска соответственно; – и + в спектральных моделях — отсутствие или наличие функции коррекции дифракции; 0, 20 и 2 — значение индекса распределения (отсутствие углового распределения, узкий и широкий угловой спектр соответственно).

Note: Sp and B are spectral and Boussinesq models, respectively; – and + in spectral models are the absence or presence of a diffraction correction function; 0, 20 and 2 are the value of the distribution index (absence of angular distribution, narrow and wide angular spectrum, respectively).

$$CKO = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [(k_{d,j})_1 - (k_{d,j})_2]^2}{N}}, \quad (19)$$

где j — номер контрольной точки; N — общее количество точек; $(k_{d,j})_1$ и $(k_{d,j})_2$ — значения коэффициентов дифракции для сравниваемых диаграмм в точке j . Значение СКО для моделей с нерегулярными волнами определялось аналогично для $k_{d,13} \%$.

Дифракционные диаграммы, полученные спектральными моделями с коррекцией дифракции, показаны в верхней части рис. 4; без коррекции дифракции — в его нижней части. По всем моделям прослеживается прямая зависимость степени проникновения волн в зону волновой тени от ширины углового распределения генерируемого спектра волн — чем шире угловой спектр волн, тем они дальше заходят за оградительные молы.

Необходимо отметить глубину проникновения изолиний коэффициента дифракции вдоль оси симметрии для волн с узким угловым распределе-

нием для всех спектральных моделей. Это больше соответствует картине изолиний по данным исследований [23]. Величина диссипации волновой энергии для волн с широким угловым распределением в зоне света представляется завышенной.

В спектральных моделях без коррекции дифракции на границе волновой тени отмечается коэффициент дифракции, равный 0,8 для модели с узким угловым спектром и 0,6–0,7 для модели с широким угловым спектром. Визуально отмечается плохое совпадение с диаграммой-эталоном.

В спектральных моделях с активированной функцией коррекции дифракции на границе волновой тени превалируют значения 0,6 для модели с узким угловым распределением и 0,5–0,6 — с широким. При этом как в зоне света, так и в зоне волновой тени изолинии коэффициента дифракции для широкого спектра лучше совпадают с диаграммой-эталоном. Заметные различия с данными исследований [23] начинаются на расстоянии примерно 5 длин волн от оградительных сооружений.

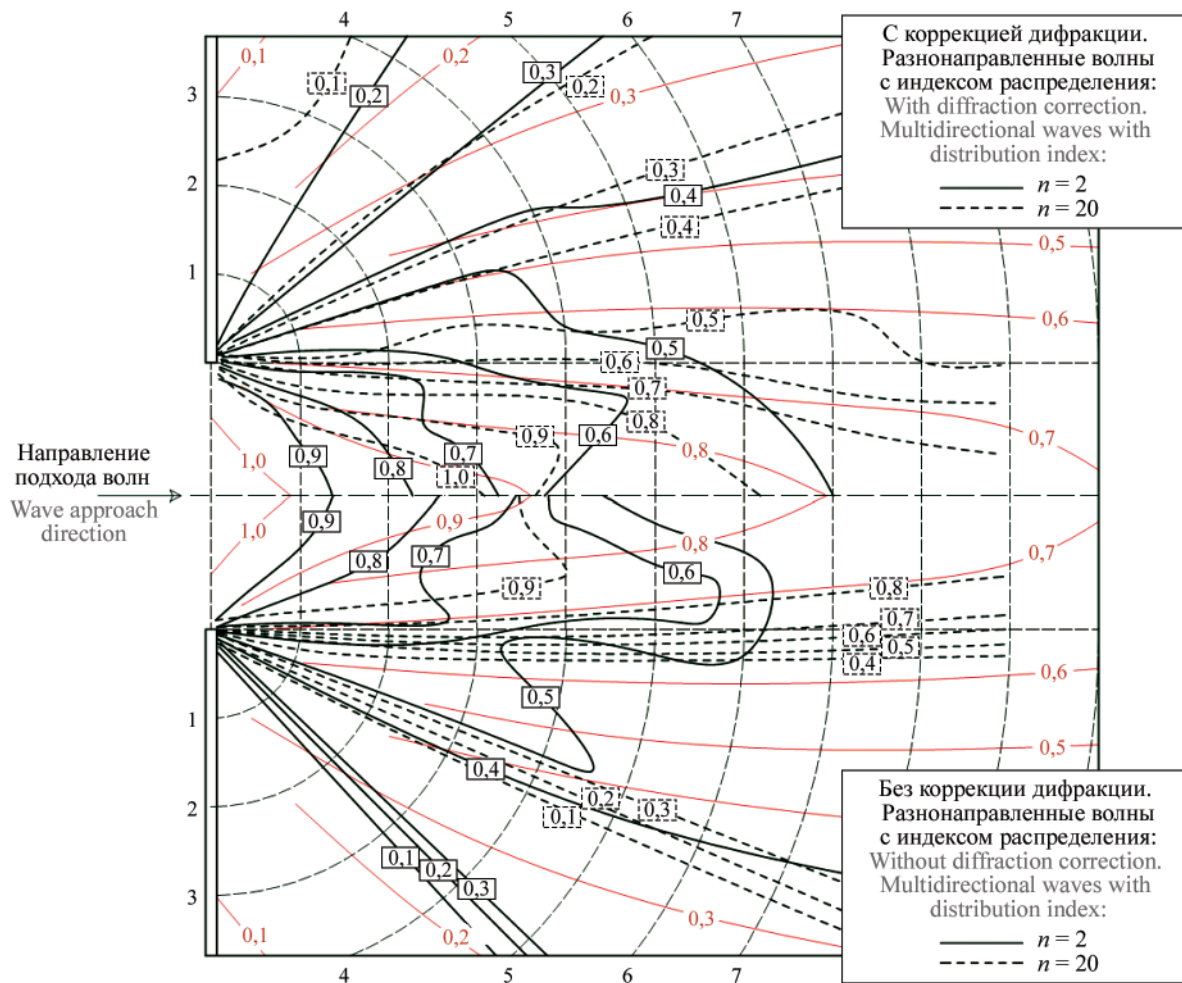


Рис. 4. Сравнение коэффициентов дифракции для моделей Сп20⁺ и Сп2⁺ (сверху), Сп20⁻ и Сп2⁻ (снизу) с данными исследований [21] (тонкие красные линии). Тонким пунктиром показаны оси, отнесенные к длине волны

Fig. 4. Comparison of diffraction coefficients for spectral models with diffraction correction (top) and without diffraction correction (bottom) with data obtained in [21] (thin red lines). The thin dotted line shows axes related to the wavelength

Численные волновые модели Буссинеска удобно разделить на две группы по виду углового распределения генерируемых волн: 1 группа — модели Б и Б0 без углового распределения (см. рис. 5 — сверху) и 2 группа — модели Б20 и Б2 с угловым распределением (см. рис. 5 — снизу). В результате для этих групп прослеживаются общие принципы распределения коэффициента дифракции.

Модели с однонаправленными волнами показывают концентрацию волновой энергии по центру, недалеко от оси симметрии. По границе волновой тени преимущественно наблюдается коэффициент дифракции 0,5. По мере продвижения в зону волновой тени расстояние между изолиниями значительно увеличивается. Необходимо также отметить появление зоны усиленного волнения напротив входа на модели с нерегулярными однонаправленными волнами: коэффициент дифракции превышает значение 1,1. Сопоставление изолиний с данными исследований [23]

показывает примерное совпадение положения изолинии для коэффициента дифракции 0,7, однако по мере отдаления от нее разница в коэффициентах дифракции становится значительной.

Модели с разнонаправленными волнами лучше распределяют волновую энергию за оградительными сооружениями. Расстояние между изолиниями более равномерно по мере движения в зону волновой тени по сравнению с однонаправленными моделями. Для модели с более широким угловым спектром (с индексом распределения $n = 2$) можно отметить более широкое распространение коэффициентов дифракции по сравнению с более узким угловым спектром. По границе волновой тени преимущественно проходит изолиния для коэффициента дифракции 0,6, что близко совпадает с данными исследований [23]. Обобщая данные по волновым моделям Буссинеска, модели с разнонаправленными волнами лучше совпадают с данными анали-

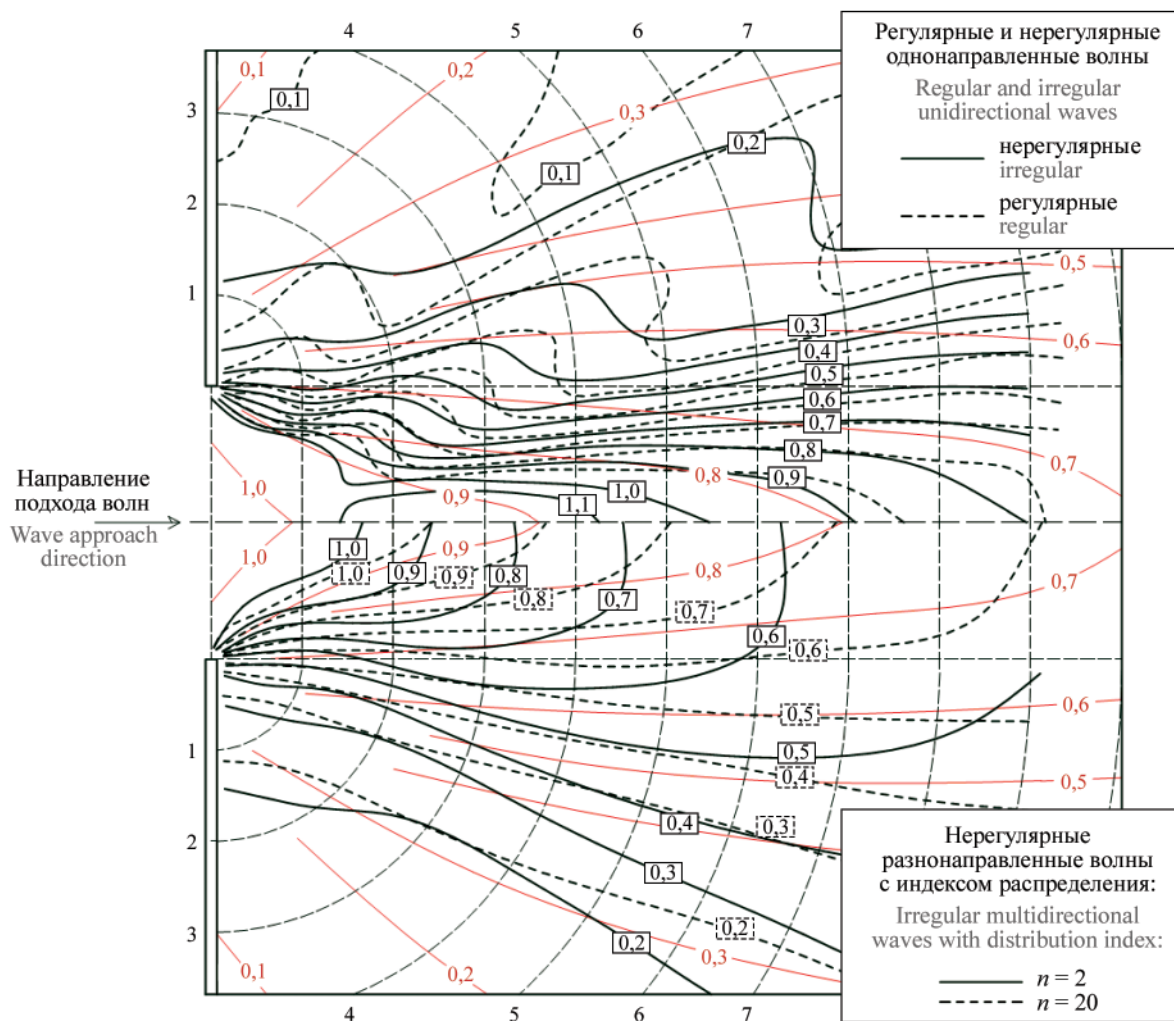


Рис. 5. Сравнение коэффициентов дифракции для моделей Б и Б0 (сверху), Б20 и Б2 (снизу) с данными исследований [21] (тонкие красные линии). Тонким пунктиром показаны оси, отнесенные к длине волны

Fig. 5. Comparison of diffraction coefficients for Boussinesq models without angle distribution (top) and with angle distribution (bottom) with data obtained in [21] (thin red lines). The thin dotted line shows the axes related to the wavelength

Табл. 2. Количественное сравнение всех численных моделей с данными исследования [23] и между собой по полученным коэффициентам дифракции в контрольных точках**Table 2.** Quantitative comparison of all numerical models with data of the study [23] and among themselves according to obtained diffraction coefficients at control points

Обозначение модели Sign of model	Исследование [23] Research [23]	Сп20 ⁻ Sp20 ⁻	Сп2 ⁻ Sp2 ⁻	Сп20 ⁺ Sp20 ⁺	Сп2 ⁺ Sp2 ⁺	Б B	Б0 B0	Б20 B20	Б2 B2
Сп20 ⁻ Sp20 ⁻	0,17	–	0,15	0,10	0,17	0,15	0,14	0,10	0,12
Сп2 ⁻ Sp2 ⁻	0,13	0,15	–	0,12	0,08	0,21	0,20	0,12	0,09
Сп20 ⁺ Sp20 ⁺	0,10	0,10	0,12	–	0,11	0,11	0,09	0,02	0,06
Сп2 ⁺ Sp2 ⁺	0,10	0,17	0,08	0,11	–	0,20	0,18	0,10	0,07
Б B	0,17	0,15	0,21	0,11	0,20	–	0,03	0,12	0,16
Б0 B0	0,15	0,14	0,20	0,09	0,18	0,03	–	0,10	0,14
Б20 B20	0,09	0,10	0,12	0,02	0,10	0,12	0,10	–	0,05
Б2 B2	0,09	0,12	0,09	0,06	0,07	0,16	0,14	0,05	–

тических расчетов и экспериментов по сравнению с однонаправленными волнами. Это совпадает с выводами в работах, рассмотренных во введении.

В табл. 2 представлено количественное сравнение численных моделей с данными исследования [23] и между собой. Сравнение выполнялось путем сравнения значений коэффициента дифракции в контрольных точках.

Наименьшие значения СКО и, следовательно, наилучшее совпадение результатов с данными аналитического расчета и экспериментов получились на волновых моделях Буссинеска с нерегулярными разнонаправленными волнами — для них СКО составило 0,09. Напротив, модели Буссинеска с регулярными и нерегулярными однонаправленными волнами показывают неудовлетворительные результаты, но практически одинаковые. Таким образом, выбор между регулярным и нерегулярным однонаправленным волновым режимом (или выбор частотного спектра) при данной постановке задачи не играет никакой роли. Гораздо более важным видится выбор углового спектра.

Также близкие значения СКО показали обе спектральные модели с активированной функцией коррекции дифракции — 0,10. Спектральные модели без активации этой функции показывают плохую сходимость, что предполагалось. Отметим, что модели без коррекции дифракции практически не совпадают ни с одной другой моделью. Показательно, что значения для узких и широких угловых спектров одинаково близки к эталону, однако между собой отличаются значительно. Из этого можно сделать вывод, что различия между значениями на-

ходятся по разные стороны от данных экспериментальных исследований, но примерно с одним размахом отклонений. Возможно, для получения более качественной картины дифракции за оградительными сооружениями следует принять среднее угловое распределение для генерируемых волн.

Также необходимо отметить, что несмотря на то, что аналитические и экспериментальные данные хорошо совпадают, реальный угловой спектр волн непостоянен от моря к морю. Более того, угловой спектр волн зависит также от частоты подходящих волн, т.е. также непостоянен от шторма к шторму. Поэтому, если достоверно неизвестен угловой спектр волн в конкретном месте исследований, для получения более полной картины дифракции за оградительными сооружениями следует смоделировать несколько штормовых ситуаций с различным угловым распределением подходящих волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среди отобранных для исследования численных волновых моделей DHI MIKE 21 — спектральной и Буссинеска — наиболее близкие результаты к данным известных экспериментов и аналитических расчетов показали волновые модели типа Буссинеска с разнонаправленными волнами. Такая численная модель может быть рекомендована как наилучшая для решения задачи дифракции реальных ветровых волн за сходящимися оградительными сооружениями.

Однако волновые модели типа Буссинеска требуют построения сеток с высоким разрешением и,

следовательно, больших вычислительных мощностей. На этом фоне спектральная волновая модель, которая требует меньших вычислительных затрат, представляется хорошей альтернативой. С новой функцией коррекции дифракции/рефракции волн на мелководье стало возможным использование спектральных моделей для исследований трансформации волнового поля вокруг сооружений. Результаты сравнения модели и данных исследований [23] подтвердили, что высота волн за сходящимися ограждающими сооружениями лучше предсказывается, если в спектральной модели включена функция коррекции дифракции.

Вид частотного спектра подходящих волн практически не влияет на картину распределения коэффициентов дифракции за ограждающими сооружениями. Большее значение имеет угловой спектр. Например, в работе [25] был сделан вывод о том,

что для узких угловых спектров дифракционный эффект играет большую роль, поскольку меньше энергии распространяется непосредственно в зону волновой тени. Тем не менее в настоящей работе ширина углового спектра не сильно влияет на степень совпадения диаграммы дифракции с диаграммой-эталоном. По всей видимости, значение индексов распределения подобраны таким образом, что изолинии коэффициентов дифракции оказались по разные стороны от соответствующих изолиний эталона.

Решение задачи дифракции методами, рассматривающими только регулярные волны, не может применяться для корректной оценки волн за ограждающими сооружениями, где сильны эффекты дифракции волн. Этот вывод экстраполируется также на физическое моделирование.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малюжинец Г.Д. Развитие представлений о явлениях дифракции (к 130-летию со дня смерти Томаса Юнга) // Успехи физических наук. 1959. Т. 69. № 10. С. 321–334. DOI: 10.3367/UFNr.0069.195910g.0321
2. Галенин Б.Г., Кузнецов В.В. Моделирование трансформации волн в прибрежной зоне // Водные ресурсы. 1980. Т. 1. С. 156–165.
3. Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction // Coastal Engineering. 1972. DOI: 10.1061/9780872620490.027
4. Berkhoff J.C.W. Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction : Ph. D. Thesis. 1976.
5. Dingemans M.W. Water wave propagation over uneven bottoms // World Scientific. 1997. DOI: 10.1142/1241-part1
6. Ilic S., Chadwick A. Evaluation and validation of the mild slope evolution equation model using field data // Proceedings of the 1995 International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments. 1995. Pp. 149–160.
7. Ilic S. Transformation of multidirectional sea field and computational study : PhD thesis. University of Plymouth, 1999. 493 p. DOI: 10.24382/1516
8. Isobe M. A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking // Coastal Engineering in Japan. 1987. Vol. 30. Issue 1. Pp. 33–47. DOI: 10.1080/05785634.1987.11924463
9. Özkan H., Kirby J.T. Evolution of breaking directional spectral waves in the nearshore zone // Ocean Wave Measurement and Analysis. 1993. Pp. 849–863.
10. O'Reilly W.C., Guza R.T. Comparison of spectral refraction and refraction-diffraction wave models // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1991. Vol. 117. Issue 3. Pp. 199–215. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1991)117:3(199)
11. Гогин А.Г. Дифракция случайных ветровых волн через суперпозицию решений для регулярных гармоник // Системные технологии. 2022. № 1 (42). С. 140–145. DOI: 10.55287/22275398_2022_1_140
12. Madsen P.A., Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry // Coastal Engineering. 1992. Vol. 18. Issue 3–4. Pp. 183–204. DOI: 10.1016/0378-3839(92)90019-q
13. Woo S.-B., Liu P.L.-F. Finite-element model for modified Boussinesq equations. I: Model development // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2004. Vol. 130. Issue 1. Pp. 1–16. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(2004)130:1(1)
14. Young I.R. The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum: Part III — Directional spreading // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57. Issue 1. Pp. 30–40. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.09.001
15. Holthuijsen L.H., Herman A., Booij N. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models // Coastal Engineering. 2003. Vol. 49. Issue 4. Pp. 291–305. DOI: 10.1016/s0378-3839(03)00065-6
16. Violante-Carvalho N., Arruda W.Z., Carvalho L.M., Rogers W.E., Passaro M. Diffraction of irregular ocean waves measured by altimeter in the lee of islands // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 265. P. 112653. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112653
17. Kantarzi I., Anshakov A., Gogin A. Composite modelling of wind waves in designing of port hydraulic structures // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2021. Pp. 2254–2261.

18. Saprykina Y., Kuznetsov S. Analysis of the variability of wave energy due to climate changes on the example of the Black Sea // *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 8. P. 2020. DOI: 10.3390/en11082020
19. Panahi R., Ghasemi A.K., Shafieefar M. Development of a bi-modal directional wave spectrum // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 105. Pp. 104–111. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.017
20. Komen G.J. et al. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge : Cambridge University Press, 1996. 532 p.
21. Hasselmann K.F., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K. et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institut, 1973. 95 p.

22. Завьялов В.К. Исследования и расчеты волнового режима на огражденных акваториях портов и аванпортов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л. : ЛПИ им. М.И. Калинина, 1976. 20 с.
23. Галенин Б.Г., Душинов Б.А., Кривицкий С.В. и др. Ветер, волны и морские порты. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 263 с.
24. Walsh M.T. Diffraction of directional wave spectra around a semi-infinite breakwater. Corps Of Engineers Buffalo Ny Buffalo District, 1992.
25. Ilic S., van der Westhuysen A.J., Roelvink J.A., Chadwick A.J. Multidirectional wave transformation around detached breakwaters // *Coastal Engineering*. 2007. Vol. 54. Issue 10. Pp. 775–789. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2007.05.002

Поступила в редакцию 3 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Григорьевич Гогин — кандидат технических наук; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 994101, Scopus: 57192663878, ResearcherID: HCH-8254-2022, ORCID: 0000-0003-3894-3680; alex.gogin@bk.ru;

Измаил Григорьевич Кантаржи — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1086368, Scopus: 6602848417, ORCID: 0000-0002-0587-4722; kantardgi@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гогин А.Г. — проведение численных исследований, обработка и анализ полученных результатов, итоговые выводы.

Кантаржи И.Г. — научное руководство, методология исследования, формулировка цели и задач исследования, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Malyuzhinec G.D. Development of ideas about the phenomena of diffraction (to the 130th anniversary of the death of Thomas Young). *Advances in the Physical Sciences*. 1959; 69(10):321-334. DOI: 10.3367/UfNr.0069.195910g.0321 (rus.).
2. Galenin B.G., Kuznecov V.V. Modeling of wave transformation in the coastal zone. *Water Resources*. 1980; 1:156-165. (rus.).
3. Berkhoff J.C.W. Computation of Combined Refraction — Diffraction. *Coastal Engineering*. 1972. DOI: 10.1061/9780872620490.027
4. Berkhoff J.C.W. *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction : Ph. D. Thesis*. 1976.
5. Dingemans M.W. Water wave propagation over uneven bottoms. *World Scientific*. 1997. DOI: 10.1142/1241-part1
6. Ilic S., Chadwick A. Evaluation and validation of the mild slope evolution equation model using field data. *Proceedings of the 1995 International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments*. 1995; 149-160.
7. Ilic S. *Transformation of Multidirectional Sea Field and Computational Study : PhD thesis*. University of Plymouth, 1999; 493. DOI: 10.24382/1516
8. Isobe M. A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking. *Coastal Engineering in Japan*. 1987; 30(1):33-47. DOI: 10.1080/05785634.1987.11924463
9. Özkan H., Kirby J.T. Evolution of breaking directional spectral waves in the nearshore zone. *Ocean Wave Measurement and Analysis*. 1993; 849-863.
10. O'Reilly W.C., Guza R.T. Comparison of spectral refraction and refraction-diffraction wave models. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1991; 117(3):199-215. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1991)117:3(199)

11. Gogin A.G. Diffraction of wind waves via superposition of solutions for regular harmonics. *System Technologies*. 2022; 1(42):140-145. DOI: 10.55287/22275398_2022_1_140 (rus.).
12. Madsen P.A., Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry. *Coastal Engineering*. 1992; 18(3-4):183-204. DOI: 10.1016/0378-3839(92)90019-q
13. Woo S.-B., Liu P.L.-F. Finite-element model for modified Boussinesq equations. I: Model development. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2004; 130(1):1-16. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(2004)130:1(1)
14. Young I.R. The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum: Part III — Directional spreading. *Coastal Engineering*. 2010; 57(1):30-40. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.09.001
15. Holthuijsen L.H., Herman A., Booij N. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. *Coastal Engineering*. 2003; 49(4):291-305. DOI: 10.1016/s0378-3839(03)00065-6
16. Violante-Carvalho N., Arruda W.Z., Carvalho L.M., Rogers W.E., Passaro M. Diffraction of irregular ocean waves measured by altimeter in the lee of islands. *Remote Sensing of Environment*. 2021; 265:112653. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112653
17. Kantarzi I., Anshakov A., Gogin A. Composite modelling of wind waves in designing of port hydraulic structures. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2021; 2254-2261.
18. Saprykina Y., Kuznetsov S. Analysis of the variability of wave energy due to climate changes on the example of the Black Sea. *Energies*. 2018; 11(8):2020. DOI: 10.3390/en11082020
19. Panahi R., Ghasemi A.K., Shafieefar M. Development of a bi-modal directional wave spectrum. *Ocean Engineering*. 2015; 105:104-111. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.017
20. Komen G.J. et al. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996; 532.
21. Hasselmann K.F., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K. et al. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut, 1973; 95.
22. Zav'yalov V.K. *Research and calculations of the wave regime in the fenced water areas of ports and outports : PhD Thesis*. Leningrad, 1976; 20. (rus.).
23. Galenin B.G., Dushnov B.A., Krivitsky S.V. et al. *Wind, waves and seaports*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986; 263. (rus.).
24. Walsh M.T. *Diffraction of directional wave spectra around a semi-infinite breakwater*. Corps of Engineers Buffalo NY Buffalo District, 1992.
25. Ilic S., van der Westhuysen A.J., Roelvink J.A., Chadwick A.J. Multidirectional wave transformation around detached breakwaters. *Coastal Engineering*. 2007; 54(10):775-789. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2007.05.002

Received February 3, 2023.

Adopted in revised form on February 28, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

BIONOTES: Aleksandr G. Gogin — Candidate of Technical Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 994101, Scopus: 57192663878, ResearcherID: HCH-8254-2022, ORCID: 0000-0003-3894-3680; alex.gogin@bk.ru;

Izmail G. Kantarzi — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1086368, Scopus: 6602848417, ORCID: 0000-0002-0587-4722; kantardgi@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr G. Gogin — numerical studies, processing and analysis of the obtained results, final conclusions.

Izmail G. Kantarzi — scientific leadership, research methodology, purpose and objectives of the study, final conclusions.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Учет анизотропных свойств галечниковых грунтов в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин

Александра Станиславовна Бестужева, Алишер Бегмуродович Абдулов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты экспериментальных исследований деформационной и прочностной анизотропии гравийно-галечникового грунта, уложенного в тело грунтовых плотин. В ходе стабилметрических испытаний получены различающиеся углы сдвига для камня при различной ориентации частиц грунта в рабочей камере — горизонтальной и вертикальной. При увеличении гидростатического давления в рабочей камере до 0,8 МПа получено снижение углов сдвига камня на 8–12 градусов в зависимости от направления слоистости грунта.

Материалы и методы. В ходе обработки экспериментов получена функция соотношения углов сдвига для камня при разной ориентации частиц в зависимости от направления главного напряжения на площадке сдвига как $\psi_{ан} = \varphi(\min)/\varphi(\max) = f(\sigma)$. Построены графики «годографы углов сдвига» для определения расчетных значений прочностных характеристик гравийно-галечникового грунта в зависимости от угла наклона площадки сдвига к оси слоистости грунта. Составлена авторская расчетная программа «ОТКОС_Ani» (Delphi), учитывающая прочностную анизотропию галечниковых грунтов для расчетов устойчивости откосов грунтовых плотин и склонов.

Результаты. Для каменных и каменно-земляных плотин разной конструкции и высоты проведены расчеты откосов и получены корректирующие коэффициенты для учета прочностной анизотропии в расчетах устойчивости откосов в виде функции $k_{ан} = K_{ан} / K_n = f(H, \gamma, m)$.

Выводы. Получены функции изменения $k_{ан}$ в зависимости от типа, высоты и плотности укладки гравийно-галечникового грунта в тело плотины. Установлено, что «понижающий» коэффициент на учет снижения прочностных свойств галечникового грунта при горизонтальной слоистости изменяется в диапазоне от 1 до 0,9, что должно быть учтено при выборе конструкции грунтовых плотин с призмами из гравийно-галечниковых грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деформационная анизотропия, прочностная анизотропия, паспорт гравийно-галечникового грунта, трехосные эксперименты, устойчивость откосов, напряженно-деформированное состояние грунтовых плотин

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бестужева А.С., Абдулов А.Б. Учет анизотропных свойств галечниковых грунтов в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 627–637. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.627-637

Автор, ответственный за переписку: Александра Станиславовна Бестужева, alex_bestu@mail.ru.

Consideration of anisotropic properties of pebble soils in calculations of stability of slopes of soil dams

Alexandra S. Bestuzheva, Alisher B. Abduloev

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

ABSTRACT

Introduction. The results of experimental studies of the deformation and strength anisotropy of gravel-pebble soil laid in the body of soil dams are presented. In the course of stabilometric tests, different shear angles for the stone were obtained with different orientations of soil particles in the working chamber — horizontal and vertical. With an increase in the hydrostatic pressure in the working chamber to 0.8 MPa, a decrease in the shear angles of the stone by 8–12 degrees was obtained, depending on the direction of the soil layering.

Materials and methods. During the processing of experiments, a function of the ratio of shear angles for a stone with different particle orientations, depending on the direction of the main stress at the shear site, was obtained as $\psi_{ан} = \varphi(\min)/\varphi(\max) = f(\sigma)$. Graphs of “hodographs of shear angles” are constructed to determine the calculated values of the strength characteristics of gravel-pebble soil, depending on the angle of inclination of the shear site to the axis of soil layering. The author’s calculation program OTKOS_Ani (Delphi) has been compiled, taking into account the strength anisotropy of pebble soils for calculating the stability of slopes of soil dams and slopes.

Results. For stone and stone-earth dams of different designs and heights, slope calculations were carried out and correction coefficients were obtained to account for strength anisotropy in slope stability calculations in the form of a function $k_{ан} = K_{ан} / K_n = f(H, \gamma, m)$.

Conclusions. The functions of the k_{an} change depending on the type, height and density of the gravel-pebble soil laying in the body of the dam are obtained. It is found that the "lowering" coefficient for taking into account the decrease in the strength properties of pebble soil with horizontal layering varies in the range from 1 to 0.9, which should be taken into account when choosing the design of soil dams with prisms of gravel-pebble soils.

KEYWORDS: deformation anisotropy, strength anisotropy, passport of gravel-pebble soil, triaxial experiments, slope stability, stress-strain state of soil dams

FOR CITATION: Bestuzheva A.S., Abduloev A.B. Consideration of anisotropic properties of pebble soils in calculations of stability of slopes of soil dams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):627-637. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.627-637 (rus.).

Corresponding author: Alexandra S. Bestuzheva, alex_bestu@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство каменно-земляных плотин во всем мире ведется не одну сотню лет. Традиционно в республиках Средней Азии, в странах Юго-Восточной Азии, в Китае такие плотины возводятся в горных условиях, в зонах высокой сейсмичности, а за последние 100 лет эти плотины входят в число самых высоких плотин мира. За многолетнюю историю своей эксплуатации каменно-земляные плотины доказали высокую надежность, экологичность, устойчивость при любых видах нагрузок, включая сильнейшие сейсмические воздействия. Наиболее экономичные конструкции с обжатым профилем могут быть получены за счет высокой степени уплотнения насыпи. Например, плотность гравийно-галечникового грунта при отсыпке Нурекской плотины достигала почти $22,5 \text{ кН/м}^3$ за счет технологии специального уплотнения, при этом у 290-метровой плотины, построенной в зоне 9-балльной сейсмичности, весьма обжатый профиль с заложением верхового откоса 1:2,2. В то же время наблюдения на уплотненной насыпи выявили необычное ее поведение с точки зрения различия в механических свойствах по направлению вдоль и поперек слоистости. Как правило, под термином «слоистость» материала понимают наличие неоднородных прослоек, формирующихся на поверхности контакта со строительной техникой, такая слоистость учитывается в конструкциях плотин из укатанного бетона, при укатке глинистого и суглинистого материала в тело противофильтрационных элементов, часто для нее используют термин «наведенная слоистость». Однако при уплотнении гравийно-галечникового грунта появляется слоистость другого рода, связанная с изменением ориентации каменных частиц в отсыпке при их послойном уплотнении. В проведенных исследованиях было получено, что неоднородность физических свойств возникает, когда «лещистость» камня, выражающаяся в соотношении максимального и минимального размера частицы, становится больше 3, такой материал — русловой галечник часто применяется в строительстве, он и был использован при отсыпке Нурекской и Рогунской плотин. Отсыпка галечникового грунта и его последующее уплотнение заставляют частицы расположиться большей плоскостью контакта

вдоль направления уплотнения. Естественно предположить, что и работа каждой отдельно взятой частицы будет протекать по-разному в зависимости от направления действующей нагрузки, что придаст в целом однородному материалу анизотропные свойства.

С целью исследования анизотропных свойств гравийно-галечниковых грунтов авторами проведены экспериментальные исследования в большом трехосном приборе. Получено, что для послойно уплотненных гравийно-галечниковых грунтов модуль деформации по направлению оси слоистости выше, чем по направлению, перпендикулярному оси слоистости, т.е. $E_x > E_y$. Полученные результаты дают основание предположить, что и прочностные характеристики гравийно-галечниковых грунтов будут различаться, что должно быть учтено в оценке устойчивости таких плотин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе поставлена задача получения функций корректирующих коэффициентов k_{an} для учета анизотропных свойств грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин по аналогии с принятым подходом к решению подобных проблем в механике грунтов. Для решения поставленной задачи авторами на основе экспериментального материала были проведены численные исследования устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом прочностной анизотропии гравийно-галечникового грунта для разных конструкций грунтовых плотин.

В задачах геомеханики явления анизотропии материала хорошо известны и учитываемы в расчетах. Осадочные грунты в естественных условиях обладают свойством фильтрационной, деформационной и прочностной анизотропии [1, 2], связанной с природной слоистостью пород. Известно, что коэффициент фильтрации в укатанных ядрах грунтовых плотин по разным направлениям может различаться в 10 и более раз [3]. В грунтовых плотинах различие деформационных и прочностных характеристик грунта по направлениям слоистости ведет к перераспределению напряжений, учет этого фактора в расчетах напряженно-деформированного состояния плотины и устойчивости откосов позволяет повысить надежность обоснования их конструкций.

Задача о распределении напряжений в основаниях с учетом анизотропных свойств грунтов имеет долгую историю исследований многими учеными: С.Г. Лехницкий [4]; О. Зенкевич [5]; К. Вольф, Л. Барден, М.Ю. Абелев [6]; Г.Г. Болдырев и И.Х. Идрисов [7, 8]; М.Н. Голдштейн и В.Б. Лапкин [9]; И.М. Набоков [10]; А.В. Школа [11] и др. В расчетах оснований для учета анизотропии слоистого грунта с различной жесткостью по направлениям предлагается ввести коэффициент анизотропии. Например, в работах З.Г. Тер-Мартirosяна [12, 13] предложено учитывать деформационную анизотропию путем введения коэффициента анизотропии в расчеты с изотропным материалом. Подобное решение предложено и О.А. Коробовой [14], для учета анизотропии в слоистых основаниях приводятся таблицы с корректирующими коэффициентами анизотропии в зависимости от степени анизотропии, глубины и размеров подошвы фундаментов.

Исследования устойчивости склонов с учетом анизотропного строения грунтовых и скальных массивов даны в трудах О.В. Зеркаль, И.К. Фоменко [15]; А.П. Кремнева, Н.Н. Вишнякова, Е.А. Седун [16] и др. В большинстве работ рассматриваются скальные массивы (склона) с разными углами напластования более слабых в прочностном отношении прослоек, линз, вдоль которых задаются отличные от всего массива параметры прочности материала. Целью настоящего исследования анизотропных свойств гравийно-галечниковых грунтов являлось получение различий в прочностных свойствах насыпного грунта в зависимости от его напряженно-деформированного состояния, в частности в зависимости от положения площадки главного напряжения в грунте по отношению к направлению оси слоистости уложенного в тело плотины галечника.

Учет анизотропии в расчетах прочности и устойчивости откосов грунтовых плотин основывается на экспериментальных исследованиях анизотропии деформационных и прочностных свойств грунтов. Для этого были проведены 3 серии экспериментов:

- в двухштамповом одометре с помощью универсальной электромеханической машины Instron 3382 при давлениях до 7 МПа в НОЦ ИС МГСУ¹;
- в вакуумном стабилометре при давлениях до 0,9 атм на кафедре ГиГС НИУМГСУ;
- в автоматизированном испытательном комплексе «АСИС» для испытаний крупнообломочных грунтов в условиях трехосного сжатия при давлениях бокового обжатия в диапазоне 0,2–0,8 МПа в НОЦ Геотехника МГСУ².

¹ Универсальная электромеханическая машина Instron 3382. URL: https://mgisu.ru/science/Expluatat_N_I_oborud/the-nbi-equipment-gr/33514/

² Автоматизированный испытательный комплекс «АСИС» для испытаний крупнообломочных грунтов в условиях трехосного сжатия. URL: https://mgisu.ru/science/Expluatat_N_I_oborud/the-nbi-equipment-gr/33492/

Для выявления анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта эксперименты проводились с горизонтальной и вертикальной ориентацией частиц по большему диаметру при их закладке в рабочую камеру, таким образом моделировалась горизонтальная и вертикальная слоистость. Минимальный размер ориентируемых частиц с соотношением сторон более 3 составлял 10 мм по меньшему размеру. Как в компрессионных, так и в трехосных экспериментах главное напряжение σ_y было направлено вертикально. Таким образом, в экспериментах определялись механические свойства грунта вдоль и поперек оси слоистости. Каждый эксперимент проводился в пяти повторях. Полученные результаты по исследованию деформационной анизотропии для гравийно-галечникового грунта во всех экспериментах дали превышение модулей деформации для вертикально уложенных частиц грунта (вдоль оси слоистости) над модулями деформации грунта, частицы которого были уложены перпендикулярно действующей нагрузке. Коэффициент анизотропии, определяемый по соотношению модулей деформации как $\eta = E_x/E_y$ (для начальных модулей деформации), в одометрических испытаниях изменяется в диапазоне от 1,2 до 1,7 [17]. При испытаниях в вакуумном стабилометре коэффициент анизотропии был получен в диапазоне от 1,7 до 1,9 [18]. В большом трехосном стабилометре при обжатии 0,2–0,8 МПа коэффициент анизотропии изменяется в диапазоне 1,2–1,4 [19, 20].

Паспорт прочности грунта

Известно, что сдвиговая прочность грунтов зависит от действующих напряжений, при этом угол сдвига φ имеет максимальное значение при малых напряжениях σ и уменьшается с ростом напряжений [21, 22]. Для получения зависимости угла сдвига от напряжений для гравийно-галечникового грунта были проведены трехосные испытания с загрузкой камня в рабочую камеру горизонтальными слоями и вертикальными, что дает параметры прочности грунта «вдоль и поперек слоистости». По результатам трехосных испытаний были построены круги Мора, которые представлены в форме паспорта прочности грунта на рис. 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования в приборах одноосного сжатия, в приборе всестороннего сжатия, в большом трехосном стабилометре позволили сделать вывод, что у гравийно-галечникового грунта, уложенного в плотину методом послойного уплотнения с наведенной горизонтальной слоистостью, наблюдается различный характер деформирования в зависимости от направления слоистости. Стабилометрические испытания грунта с разной ориентацией частиц в рабочей камере при боковых давле-

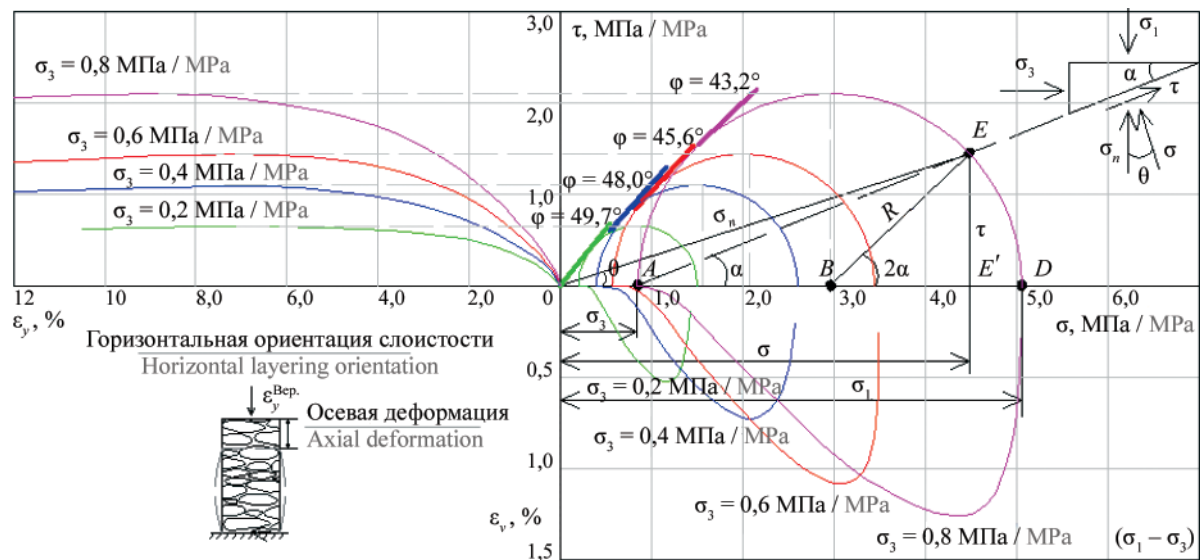


Рис. 1. Паспорт прочности грунта при горизонтальной слоистости

Fig. 1. Soil strength certificate for horizontal layering orientation

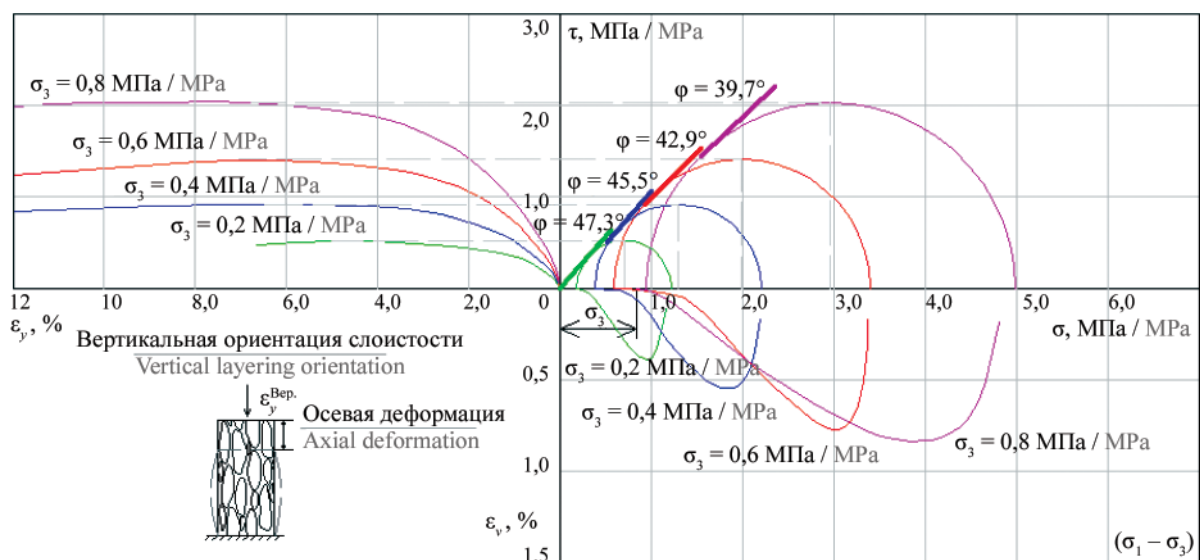


Рис. 2. Паспорт прочности грунта при вертикальной слоистости

Fig. 2. Soil strength certificate for vertical layering orientation

ниях σ_3 от 0,2 до 0,8 МПа с доведением образцов до разрушения позволяют получить не только характеристики деформационной анизотропии грунта, но и перейти к характеристикам прочностной анизотропии грунта — углам сдвига. Обработка экспериментов с построением кругов Мора для двух вариантов укладки грунта позволяет установить зависимость изменения углов сдвига грунта от осевого давления на штампе и от нормального давления на площадке сдвига $\varphi = f(\sigma)$ для разной ориентации оси слоистости по отношению к направлению главного напряжения σ_1 (рис. 3). В каждом эксперименте при доведении образца до разрушения (форми-

рование поверхности сдвига) главные напряжения σ_1 и σ_3 фиксируются и согласно условию прочности Кулона — Мора определяется параметр прочности грунта — угол сдвига φ :

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} . \quad (1)$$

Угла начального зацепления в исследуемых образцах нет.

По полученным значениям углов сдвига в экспериментах с разной ориентацией частиц (рис. 1) построены аппроксимирующие зависимости $\varphi = f(\sigma)$ в виде:

- для горизонтальной слоистости $\varphi_{\perp}$:

$$\varphi_{\max} = 1,57\sigma^2 - 8,56\sigma + 52,86; \quad (2)$$

- для вертикальной слоистости $\varphi_{\parallel}$:

$$\varphi_{\min} = 1,27\sigma^2 - 8,97\sigma + 50,78; \quad (3)$$

где σ — величина нормального напряжения на площадке сдвига, МПа.

Как видно, в отличие от деформационных свойств, значение углов сдвига для гравийно-галечникового грунта по направлению слоистости $\varphi_{\parallel}$ ниже, чем значения углов сдвига по направлению поперек слоистости $\varphi_{\perp}$ ($\varphi_x < \varphi_y$). Полученные в экспериментах функции $\varphi = f(\sigma)$ в зависимости от нормального давления на площадке сдвига и от ориентации оси слоистости по отношению к направлению главного напряжения на площадке сдвига (рис. 3) коррелируются с данными экспериментов, приведенными в работах Л.Н. Рассказова [23] (рис. 4), А.А. Кагана [24] (рис. 5).

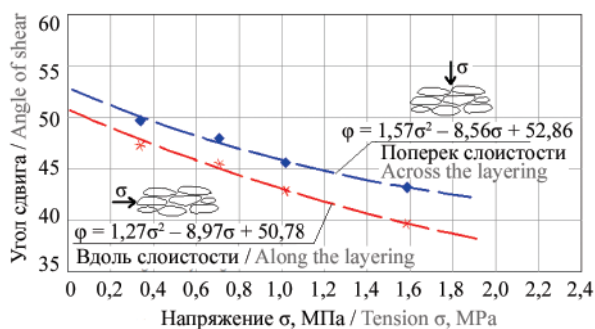


Рис. 3. Изменение углов сдвига гравийно-галечникового грунта с ростом действующих напряжений $\varphi = f(\sigma)$ по результатам трехосных испытаний для разных схем укладки грунта

Fig. 3. Change in shear angles of gravel-pebble soil with an increase in acting stresses $\varphi = f(\sigma)$ according to the results of triaxial tests for different soil laying patterns

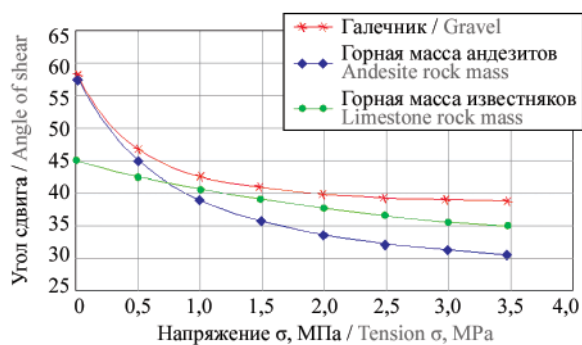


Рис. 4. Зависимость сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов по Рассказову – Гордиенко [23]

Fig. 4. Dependence of shear resistance of coarse clastic soils according to Rasskazov – Gordienko [23]

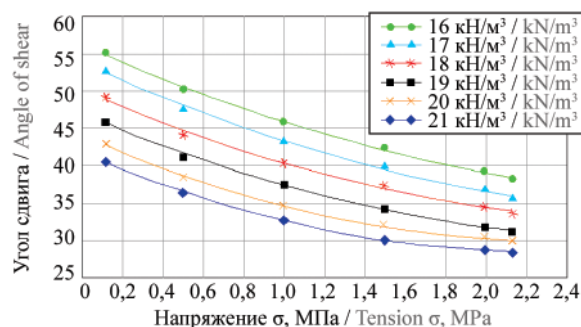


Рис. 5. Зависимость сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов по А.А. Кагану [24]

Fig. 5. Dependence of shear resistance to shear of coarse elastic soils according to A.A. Kagan [24]

На основании графиков функции $\varphi_{\max} = f(\sigma)$ (2) и $\varphi_{\min} = f(\sigma)$ (3) может быть получена функция соотношения углов сдвига грунта в зависимости от нормального напряжения:

$$\Psi_{\text{ан}} = \varphi_{\min} / \varphi_{\max} = \varphi_x / \varphi_y = f(\sigma),$$

график которой представлен на рис. 6.

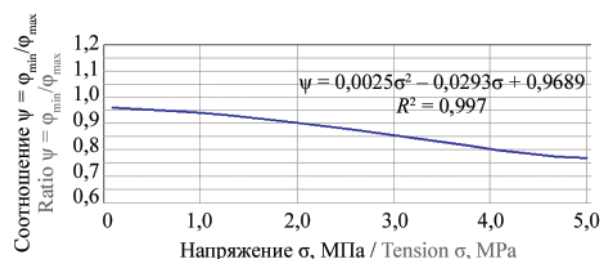


Рис. 6. Соотношение углов сдвига гравийного материала $\varphi_{\min} / \varphi_{\max}$ в зависимости от нормального напряжения на площадке сдвига

Fig. 6. Ratio of shear angles of gravel material of $\varphi_{\min} / \varphi_{\max}$ depending on the normal stress at the shear site

Различие в прочностных характеристиках гравийно-галечникового грунта в зависимости от положения оси слоистости по отношению к положению площадки главного напряжения (ПГН) в некоторой точке грунта на площадке сдвига может быть представлено в виде годографа углов сдвига, изменяющихся по закону эллипса. В качестве наибольшего и наименьшего радиуса полуосей эллипса приняты значения углов сдвига материала при расположении площадки главного напряжения вдоль и перпендикулярно оси слоистости грунта. Направление оси слоистости материала на годографе принято горизонтальным, вдоль по оси x . Таким образом, в экспериментах с горизонтальным расположением частиц вектор главного напряжения (осевое сжатие) перпендикулярен оси слоистости, а ПГН параллельна оси слоистости (ОС) материала; в этом экспери-

менте угол сдвига принимает наибольшее значение: $\varphi_{\max} = b$, что отложено на большой (вертикальной) полуоси эллипса (рис. 7).

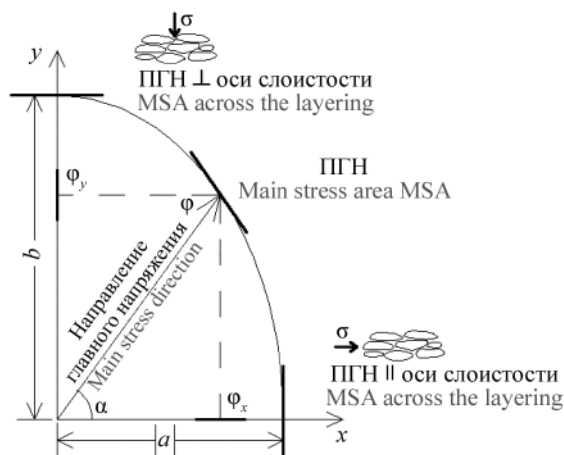


Рис. 7. Расчетная схема для определения значений $\varphi = f(\alpha)$

Fig. 7. Calculation scheme for determining the values of $\varphi = f(\alpha)$

В эксперименте с вертикальной ориентацией частиц в рабочей камере угол сдвига получен меньше: $\varphi_{\min} = a$, он отложен на горизонтальной оси (рис. 7), при этом ПГН перпендикулярна оси слоистости материала.

Для произвольного направления действия главного напряжения по отношению к оси слоистости материала, что принято на угол α , можно получить выражение для величины угла сдвига на основе канонического уравнения эллипса, которое в декартовой системе координат записывается в виде:

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1, \quad (4)$$

где a, b — значения главных (меньшей и большей) полуосей эллипса.

Любая материальная точка на поверхности эллипса (т. М) задает направление главного напряжения в виде вектора, соединяющего начало координат (пересечение главных осей эллипса) с самой точкой, при этом угол между направлением главного напряжения и осью слоистости определяется как угол α , $0 \leq \alpha \leq \pi/2$.

Для т. М на поверхности эллипса значение угла сдвига определяется по величине радиуса-вектора φ . Для определения φ по известному углу α можно записать уравнение эллипса в параметрической форме:

$$\begin{cases} \varphi_x = \varphi \cdot \cos \alpha, \\ \varphi_y = \varphi \cdot \sin \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) получим выражение для φ :

$$\varphi = \sqrt{\frac{a^2 \cdot b^2}{(b^2 \cdot \cos^2 \alpha + a^2 \cdot \sin^2 \alpha)}}. \quad (6)$$

Таким образом, значение угла сдвига φ с учетом анизотропии в зависимости от направления вектора главных напряжений по отношению к направлению слоистости материала, т.е. в зависимости от угла α , может быть определено по формуле (6). Значения углов сдвига a и b , входящие в выражение (6), определяются по функциональным зависимостям (2) и (3) в зависимости от нормального напряжения на площадке сдвига (рис. 3). Для определения траекторий действия главных напряжений в расчетных элементах плотин могут быть решены задачи о напряженно-деформированном состоянии плотины, в том числе с учетом деформационной анизотропии грунта, из которых в каждой точке поверхности обрушения может быть получен угол α .

С целью разработки методики расчетов устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом прочностной анизотропии, на основе полученных экспериментальных данных, авторами были составлены математические модели изменения прочностных свойств материала в зависимости от величины и направления главного напряжения по отношению к оси слоистости материала, разработана методика расчета и написана программа расчета «ОТКОС-Ани» по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения в среде программирования Delphi 10.

Были проведены расчеты плотин разных конструкций и разной высоты с учетом и без учета анизотропного различия прочностных характеристик материала. На основе проведенных расчетов были получены корректирующие коэффициенты $k_{\text{ан}}$ для учета анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в расчетах устойчивости откосов различных типов плотин по формуле:

$$k_{\text{ан}} = \frac{K_n^{\text{ан}}}{K_n}, \quad (7)$$

где $K_n^{\text{ан}}$ — коэффициент запаса устойчивости откосов плотины в расчете с учетом свойств прочностной анизотропии гравийно-галечникового грунта; K_n — коэффициент запаса устойчивости откосов плотины в расчетах без учета анизотропных свойств грунта.

Тестирование программы проводилось в ходе сопоставления полученных результатов с результатами расчетов по программе Otkos, разработанной и использующейся в практике расчетов на кафедре ГиГС НИУ МГСУ более 30 лет [25, 26].

Серии расчетных задач включали конструкции однородных плотин, плотин с центральным ядром, плотин с противофильтрационным экраном и плотин с диафрагмой. Типовые конструкции плотин рассматривались в вариантах разной высоты: 20, 50, 150, 200, 250, 300 м и разного заложения откосов,

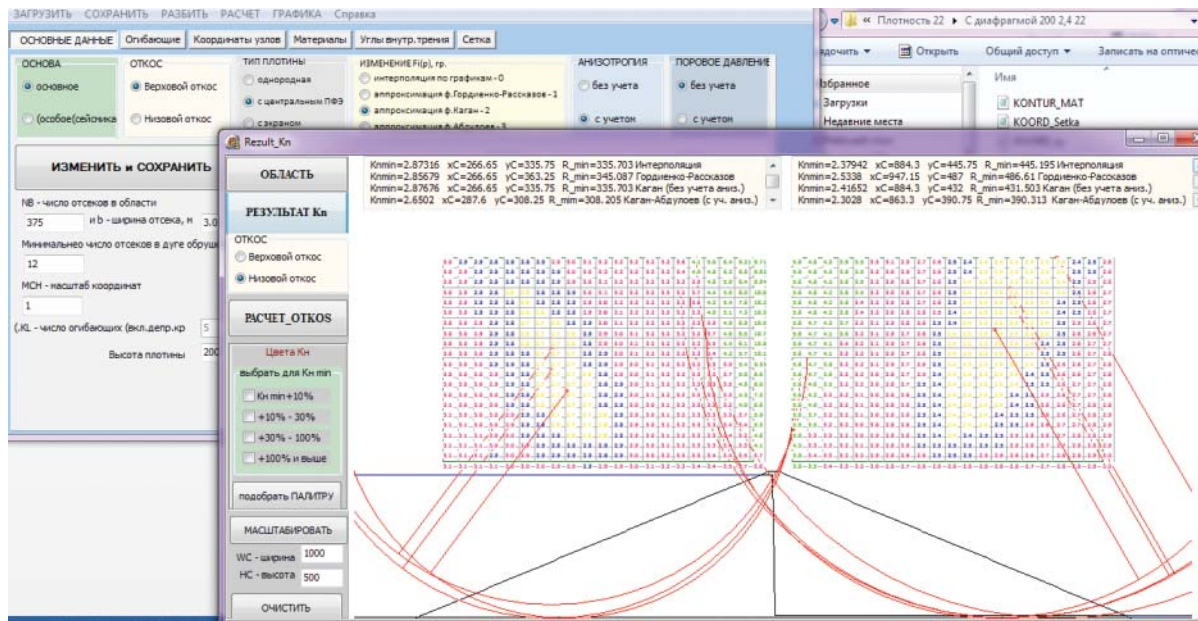


Рис. 8. Расчет устойчивости откосов плотины с учетом и без учета прочностной анизотропии для плотины 200-метровой высоты

Fig. 8. Calculation of the stability of dam slopes with and without taking into account strength anisotropy for a dam with a height of 200 m

которое принималось одинаковым для верховой и низовой призмы, при этом рассматривались варианты заложения: 1:1,6 и 1:2,4.

Интерфейс программного комплекса с расчетом представлены на рис. 8 для каменно-насыпной плотины с диафрагмой 200-метровой высоты с заложением откосов 1:2,4.

Проведенные расчеты показали, что влияние прочностной анизотропии проявляется в снижении коэффициентов запаса устойчивости от 3 до 11 % в зависимости от типа и высоты плотин. Полученные поправочные коэффициенты анизотропии k_{an} для учета прочностной анизотропии в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин приведены

на рис. 9 и 10 (для плотины с экраном) и на рис. 11 и 12 (для плотины с центральным противофильтрационным элементом).

Как видно, поправочный коэффициент k_{an} меньше единицы, поэтому коэффициент устойчивости откоса с учетом анизотропных свойств грунта снижается по сравнению с устойчивостью изотропного грунта:

$$K_n^{an} = k_{an} \cdot K_n. \quad (8)$$

По мере увеличения высоты плотины корректирующий коэффициент снижается и наименьшее значение коэффициента $k_{an} = 0,89$ получено для верхового откоса плотин с экраном.

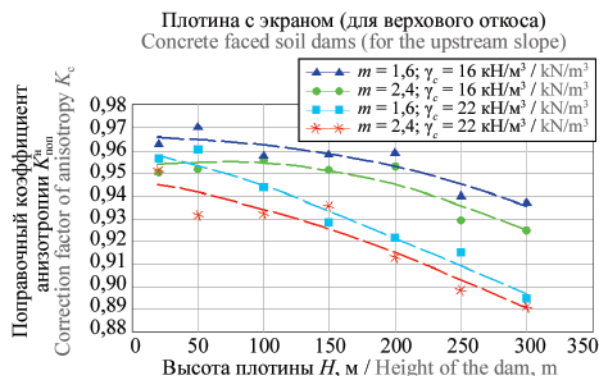


Рис. 9. k_{an} для учета прочностной анизотропии грунтовых плотин с экраном (для верхового откоса)

Fig. 9. k_{an} to take into account the strength anisotropy of concrete faced soil dams (for the upstream slope)

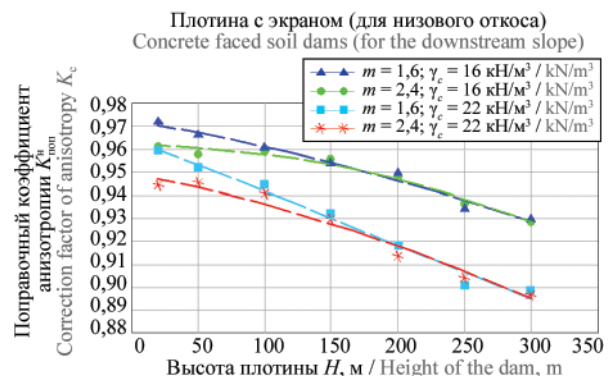


Рис. 10. k_{an} для учета прочностной анизотропии грунтовых плотин с экраном (для низового откоса)

Fig. 10. k_{an} to take into account the strength anisotropy of concrete faced soil dams (for the downstream slope)

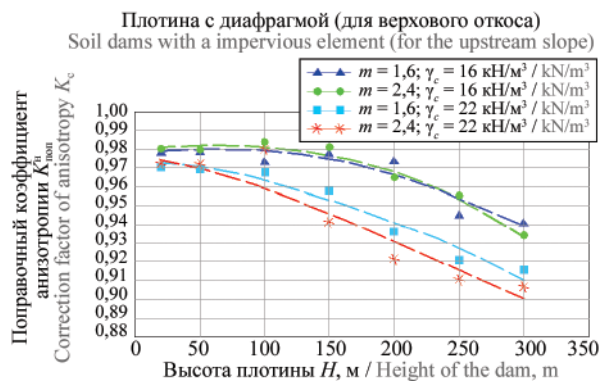


Рис. 11. k_{an} для учета прочностной анизотропии грунтовых плотин с центральным противифльтрационным элементом (для верхового откоса)

Fig. 11. k_{an} to take into account the strength anisotropy of soil dams with a central impervious element (for the upstream slope)

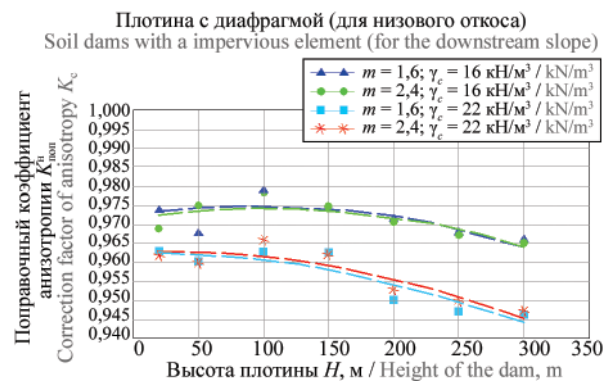


Рис. 12. k_{an} для учета прочностной анизотропии грунтовых плотин с центральным противифльтрационным элементом (для низового откоса)

Fig. 12. k_{an} to take into account the strength anisotropy of soil dams with a central impervious element (for the downstream slope)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования в приборах одноосного сжатия, в приборе всестороннего сжатия, в большом трехосном стабилометре показали, что у гравийно-галечникового грунта, уложенного в плотину методом послойного уплотнения (горизонтальная слоистость), наблюдается различный характер деформирования в зависимости от направления главного напряжения, при этом $E_x > E_y$. Соотношение модулей характеризуется коэффициентом деформационной анизотропии грунта $\eta = E_x/E_y$, который снижается по мере роста нагрузки. Максимальные значения коэффициента анизотропии были получены в одометрических испытаниях 1,9, в стабилометрических испытаниях — 1,4.

Анизотропные свойства послойно уплотненного гравийно-галечникового грунта проявляются также в прочностной анизотропии. Получено, что углы сдвига грунта в направлении поперек слоистости выше, чем вдоль слоистости ($\varphi_x < \varphi_y$). Различие

в максимальных углах сдвига составляет 2–5 градусов, по мере роста напряжений различие в углах сдвига увеличивается.

Разработана методика расчета устойчивости откосов каменных и каменно-земляных плотин с учетом прочностной анизотропии грунтов в зависимости от напряженно-деформированного состояния плотины и положения площадок главных напряжений в расчетной области, реализованная в программном комплексе ОТКОС-Ani.

По результатам расчетов выявлено, что поправочный коэффициент на учет анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в расчетах устойчивости откосов k_{an} зависит от типа плотины (с экраном, с диафрагмой, с ядром), высоты и плотности укладки грунта в упорные призмы плотины. Согласно полученным графикам, на рис. 9–12 значения коэффициента изменяются в диапазоне 0,89–0,97, что дает снижение коэффициентов запаса устойчивости откосов на 3–11 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П. и др. Гидротехнические сооружения (речные). Часть 1 : учебник для вузов. 2-е изд., исп. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2011. 374 с.
2. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. СПб. : Недра, 1993. 245 с.
3. Анискин Н.А., Мемарианфард М.Е. Влияние фильтрационной анизотропии грунтов тела плотины на параметры фильтрационного потока и устойчи-

вость откосов // Гидротехническое строительство. 2011. № 10. С. 17–21.

4. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1977. 416 с.

5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. М. : Мир, 1975. С. 67.

6. Абелев Ю.М., Абелев М.Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. М. : Стройиздат, 1979. 271 с.

7. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Часть 1. Влияние направления главного напряжения на прочность грунтов // Геотехника. 2017. № 5. С. 4–19.
8. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Часть 2. Эффект вращения наибольшего главного напряжения на прочность грунта // Геотехника. 2017. № 6. С. 4–18.
9. Голдштейн М.Н., Лапкин В.Б. К вопросу о распределении напряжений в трансверсально-изотропной грунтовой среде // Вопросы геотехники. 1972. Т 21. С. 68–85.
10. Набоков И.М. Некоторые результаты исследований влияния анизотропии на напряженно-деформированное состояние грунтового основания, нагруженного абсолютно жестким штампом // Основания и фундаменты : сб. тр. Минск : Госстрой БССР, 1976. Вып. 12. С. 43–46.
11. Школа А.В. Несущая способность оснований и боковое давление грунтов, анизотропных по сопротивлению сдвигу : учеб. пос. М., 1991. 42 с.
12. Тер-Мартirosян З.Г. Напряженно-деформированное состояние анизотропного водонасыщенного основания // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 28–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15204286>
13. Тер-Мартirosян З.Г., Ала Сайд Мухамед Абдул Малек, Тер-Мартirosян А.З., Аинбетов И.К. Напряженно-деформированное состояние двухслойного основания с преобразованным верхним слоем // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 81–95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19114033>
14. Коробова О.А. Комплексные исследования напряженного состояния и деформируемости анизотропных грунтовых оснований : дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2002. 341 с.
15. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 44–51.
16. Кремнев А.П., Вишняков Н.Н., Седун Е.А. Влияние анизотропии прочностных свойств грунтов на устойчивость откосов // Геотехника Беларуси: наука и практика : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского (г. Минск, 23–25 октября 2013 г.) : 2 ч. Ч. 1. Минск : БНТУ, 2013. С. 261–264. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/10610>
17. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Абдулов А.Б. Деформационная анизотропия гравийно-галечниковых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 4. С. 6–9.
18. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Абдулов А.Б. Исследование анизотропии галечниковых грунтов в условиях стабилометрических испытаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 4. С. 14–17.
19. Абдулов А.Б., Бестужева А.С. Исследование анизотропных свойств галечниковых грунтов // Обеспечение качества, безопасности и экономичности строительства. Практика. Проблемы. Перспективы. Инновации : мат. Второй совм. науч.-практ. конф. ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН. (г. Москва, 12–13 декабря 2019 г.). М., 2020. С. 167–176. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43850931>
20. Bestuzheva A., Abduloev A. Experimental studies of deformation anisotropy of gravel soils // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883. Issue 1. P. 012189. DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012189
21. Абдулов А.Б., Бестужева А.С. Лабораторные исследования деформационной анизотропии галечника, уложенного в тело грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2020. № 11. С. 26–32. DOI: 10.34831/EP.2020.98.91.003
22. Абдулов А.Б., Бестужева А.С. Результаты экспериментальных исследований деформационной анизотропии галечникового грунта // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 298. С. 49–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44411438>
23. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П. и др. Гидротехнические сооружения (речные). Часть 1 : учеб. для вузов. 1-е изд., испр. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2011. 584 с.
24. Каган А.А., Дашко Р.Э. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М. : Недра, 1977. 237 с.
25. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С. Расчет устойчивости откосов на ЭВМ ЕС-1033. Методические указания к выполнению курсового и дипломного проектирования. Ч. 1. М. : МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1988. 41 с.
26. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С. Расчет устойчивости откосов на ЭВМ ЕС-1033. Методические указания к выполнению курсового и дипломного проектирования. Ч. 2. М. : МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1988. 30 с.

Поступила в редакцию 30 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александра Станиславовна Бестужева** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 274595, Scopus: 57218418102, ORCID: 0000-0002-0821-4922; alex_bestu@mail.ru;

Алишер Бегмуродович Абдулов — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979619; abduloev.alisher91@mail.ru.

Вклад авторов:

Бестужева А.С. — научное руководство, создание программного комплекса «ОТКОС-Апi», написание исходного текста, итоговые выводы.

Абдулов А.Б. — проведение экспериментов, обработка материала, проведение расчетов, создание иллюстраций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P. et al. *Hydraulic structures (river). Part 1*. Textbook for universities. 2nd ed., corrected and enlarged. Moscow, Publishing House of the Association of Construction Universities, 2011; 374. (rus.).
2. Bugrov A.K., Golubev A.I. *Anisotropic soils and foundations of structures*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 1993; 245. (rus.).
3. Aniskin N.A., Memarianfard M.E. Influence of filtration anisotropy of dam body soils on filtration flow parameters and slope stability. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2011; 10:17-21. (rus.).
4. Lekhnitsky S.G. *Theory of elasticity of an anisotropic body*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1977; 416. (rus.).
5. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, McGraw-Hill, 1971; 521.
6. Abelev Yu.M., Abelev M.Yu. *Fundamentals of design and construction on subsidence macroporous soils*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979; 271. (rus.).
7. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh. State of the art: studies of the anisotropic behavior of soils under conditions of a complex stress state. Part 1. Effect of the principal stress direction on the soils strength. *Geotechnics*. 2017; 5:4-19. (rus.).
8. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh. State of the art: Studies of the anisotropic behavior of soils under conditions of a complex stress state. Part 2. The effect of major principal stress rotation on the soil strength. *Geotechnics*. 2017; 6:4-18. (rus.).
9. Goldstein M.N., Lapkin V.B. Revising the question of stress distribution in a transversely isotropic soil. *Questions of Geotechnics*. 1972; 21:68-85. (rus.).
10. Nabokov I.M. Some results of studies of the influence of anisotropy on the stress-strain state of a soil foundation loaded with an absolutely rigid stamp. *Bases and Foundations : Collection. Proceedings*. Minsk, Gosstroy Publ., 1976; 12:43-46. (rus.).
11. Shkola A.V. *Bearing capacity of foundations and lateral pressure of soils with anisotropic shear resistance : Tutorial*. Moscow, 1991; 42. (rus.).
12. Ter-Martirosyan Z.G. Stress-strain state of an anisotropic water-saturated base. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2006; 1:28-37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15204286> (rus.).
13. Ter-Martirosyan Z.G., Ala Sayd Mukhamed Abdul Malek, Ter-Martirosyan A.Z., Ainbetov I.K. Stress-strain state of a two-layer base with a transformed top layer. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2008; 2:81-95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19114033> (rus.).
14. Korobova O.A. *Complex studies of the stress state and deformability of anisotropic soil foundations : Dissertation of the Doctors of Technical Sciences*. Barnaul, 2002; 341. (rus.).
15. Zertsal O.V., Fomenko I.K. Evaluation of the influence of anisotropy of soil properties on the stability of slopes. *Engineering Research*. 2013; 9:44-51 (rus.).
16. Kremnev A.P., Vishnyakov N.N., Sedun E.A. Influence of anisotropy of strength properties of soils on slope stability. *Geotechnics of Belarus: Science and Practice : materials of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Department of Foundations, Foundations and Engineering Geology and the 90th anniversary of the birth of Professor Yuri Alexandrovich Sobolevsky (Minsk, October 23–25, 2013) : in 2 parts. Part 1*. Minsk, BNTU, 2013; 261-264. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/10610> (rus.).
17. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Abduloyev A.B. Deformation anisotropy of pebble-gravel soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 4:233-236. DOI: 10.1007/s11204-018-9530-4
18. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S., Abduloyev A.B. The study of the anisotropy of gravel soils under conditions of stabilometrical tests. *Soil Me-*

chanics and Foundation Engineering. 2019; 4:14-17. DOI: 10.1007/s11204-019-09599-2

19. Abduloyev A.B., Bestuzheva A.S. Study of the anisotropic properties of pebble soils. *Ensuring the quality, safety and economy of construction. Practice. Problems. Perspectives. Innovation : Materials of the Second joint scientific and practical conference of GBU "CEIIS" and IPRIM RAS. (Moscow, December 12–13, 2019)*. Moscow, 2020; 167-176. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43850931> (rus.).

20. Bestuzheva A., Abduloyev A. Experimental studies of deformation anisotropy of gravel soils. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 883(1):012189. DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012189

21. Abduloyev A.B., Bestuzheva A.S. Laboratory studies of deformation anisotropy of pebbles in the body of a stone dam. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2020; 11:26-32. DOI: 10.34831/EP.2020.98.91.003 (rus.).

22. Abduloyev A.B., Bestuzheva A.S. Results of experimental research on strain-induced anisotropy in pebble gravel. *Izvestia VNIIG B.E. Vedeneva*.

2020; 298:49-58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44411438> (rus.).

23. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Soldatov P.V., Tolstikov V.V. *Hydraulic structures (river). Part 1. Textbook for universities*. 2nd ed., corrected and enlarged. Moscow, ASV Publ., 2011; 584. (rus.).

24. Kagan A.A., Dashko R.E. *Mekhanika gruntov v inzhenerno-geologicheskoy praktike Soil mechanics in engineering-geological practice*. Moscow, Nedra Publ., 1977; 237. (rus.).

25. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S. *Calculation of slope stability on the ES-1033 computer. Guidelines for the implementation of course and diploma design. Ch. 1*. Moscow, MISI im. V.V. Kuybysheva, 1988; 41. (rus.).

26. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S. *Calculation of slope stability on the ES-1033 computer. Guidelines for the implementation of course and diploma design. Ch. 2*. Moscow, MISI im. V.V. Kuybysheva, 1988; 30. (rus.).

Received January 30, 2023.

Adopted in revised form on March 6, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

B I O N O T E S: **Alexandra S. Bestuzheva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 274595, Scopus: 57218418102, ORCID: 0000-0002-0821-4922; alex_bestu@mail.ru;

Alisher B. Abduloyev — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 979619; abduloyev.alisher91@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexandra S. Bestuzheva — scientific guidance, creation of the program "OTKOS-Ani", writing source text, final conclusions.

Alisher B. Abduloyev — conducting experiments, processing material, making calculations, creating illustrations.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

UDC 331.103.3:004

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.638-650

Regression rationing of labour costs based on the estimation of their actual values by neural network modelling

Khoshnaw Y.B. Hussein¹, Sergey A. Bolotin¹, Nadim Q.R. Huraini¹, Haitham Boxan^{1,2}

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);

Saint Petersburg, Russian Federation;

² Thi-Qar University; Republic of Iraq

ABSTRACT

Introduction. Labour rationing is an integral part of effective management of construction production. It is proved by the experience of economically developed countries, where labour rationing is connected with all spheres of enterprises: industrial, technical, organizational, financial, economic and social. Modern methods of labour rationing were created by specialists from economically developed countries. The purpose of this article is to improve the efficiency of the construction industry in the Republic of Iraq by adapting modern labour cost standards to the construction industry.

Materials and methods. The method of neural network modelling was used in the work.

Results. The networks under consideration were tested to obtain labour costs based on the implementation of production standards, which are known to be the inverse of labour costs. As a result of the experiment, instead of actual labour costs the actual output was introduced, and the inverse value was calculated using the output standards obtained from the neural network modelling.

Conclusions. The presented excursus on the labour rationing methods used makes it clear that the creation of appropriate databases requires significant costs and time. Therefore, another alternative to this approach is to use already developed regulatory databases that can be adapted to the construction industry in the Republic of Iraq. In order to implement such an approach, it is necessary to analyze the existing databases and establish such an up-to-date database that would have the greatest correspondence with the actual labour costs specific to the construction industry of the Republic of Iraq. As a generalized conclusion about the practical result of the presented development, a stepwise regression methodology for the formation of labour costs for a selected type of work is presented.

KEYWORDS: labour cost, labour regulation, neural network, statistics, construction management, regression analysis, construction industry, approximating, neural network modelling, linear models, nonlinear models, measurement, database

FOR CITATION: Hussein Kh.Y.B., Bolotin S.A., Huraini N.Q.R., Boxan H. Regression rationing of labour costs based on the estimation of their actual values by neural network modelling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):638-650. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.638-650 (rus.).

Corresponding author: Khoshnaw Y.B. Hussein, yousif.babakr@gmail.com.

Регрессионное нормирование трудозатрат на основе оценки их фактических значений методом нейросетевого моделирования

Хошнава Юсиф Бабакар Хуссейн¹, Сергей Алексеевич Болотин¹,
Надим К.Р. Хурейни¹, Хайтам Бохан^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия;

² Университет Ди-Кар; Республика Ирак

АННОТАЦИЯ

Введение. Органической частью эффективного управления строительным производством служит нормирование труда. На это указывает опыт экономически развитых стран, где с нормированием труда связаны все сферы деятельности предприятий: производственная, техническая, организационная, финансово-экономическая и социальная. Современные методы нормирования труда были созданы специалистами экономически развитых стран. Цель исследования — повысить эффективность строительной отрасли в Республике Ирак на основе адаптации современных стандартов затрат на рабочую силу к строительной отрасли.

Материалы и методы. Использовался метод нейросетевого моделирования.

Результаты. Рассматриваемые сети протестированы на получение трудозатрат по результатам внедрения производственных стандартов, которые, как известно, являются обратной величиной трудозатрат. В результате эксперимента вместо фактических трудозатрат введены фактические выработки, а обратная величина рассчитана с помощью нормы выработки, полученной в итоге нейросетевого моделирования.

Выводы. Представленный экскурс по применяемым методам нормирования труда позволяет понять, что для создания соответствующих баз данных (БД) требуются существенные затраты и время. Поэтому другая альтернатива указанного подхода — использование уже разработанных нормативных БД, которые можно адаптировать к строительной отрасли Республики Ирак. Для того чтобы внедрить этот подход, необходимо проанализировать имеющиеся БД и установить такую актуальную БД, которая обладала бы наибольшим соответствием фактических трудовых затрат, характерных для строительной отрасли Республики Ирак. В качестве обобщенного вывода о практическом результате данной разработки представлена пошаговая регрессионная методология формирования трудозатрат для выбранного вида работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: затраты на рабочую силу, регулирование труда, нейронная сеть, статистика, управление строительством, регрессионный анализ, строительная отрасль, аппроксимация, нейросетевое моделирование, линейные модели, нелинейные модели, измерение, база данных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хуссейн Х.Ю.Б., Болотин С.А., Хурейни Н.К.Р., Бохан Х. Regression rationing of labour costs based on the estimation of their actual values by neural network modeling // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 638–650. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.638-650

Автор, ответственный за переписку: Хошнаф Юсиф Бабакр Хуссейн, yousif.babakr@gmail.com.

INTRODUCTION

The aim of this paper, to enhance the efficiency of the construction industry in the Republic of Iraq based on the adaptation of modern standards of labour costs to the construction industry.

Own regulatory framework should be created, and for its creation it is necessary to form an appropriate rational approach. An organic part of effective construction management is labour regulation. This is indicated by the experience of economically developed countries, where all areas of activity of enterprises are associated with labour standards: production, technical, organizational, financial, economic and social. Modern methods of labour regulation were created by specialists of economically developed countries. In order to enhance the efficiency of the functioning of the construction industry in the Republic of Iraq, its own regulatory framework must be created, and for its creation it is necessary to formulate an appropriate rational approach.

As one of the options, you can consider creating your own regulatory framework based on the use of classical timing methods. In its essence, the timing approach involves the physical measurement of the duration of construction processes, and various software tools are used to process the measurement results. For example, the Canadian company Quetech Ltd developed the WorkStudy + program, whose users include such well-known corporations as General Motors, Boeing, Deloitte & Touch.

Another timing method is the method of moment observations, which consists in the statistical processing of the results of observations carried out over a certain time period for individual groups of workers and mechanisms. Using this method, the observer systematically or at random points in time notes which actions are carried out by an employee or a group of employees at the time of observation.

A productive approach is implemented in the so-called physiological method, which provides extremely high accuracy and objectivity of measurement results, which is uncharacteristic of most other methods. The essence of this method is that labour standards are determined on the basis of measurements of the energy costs of the employee obtained from the following characteristics: oxygen consumed by the employee, heart rate, pulmonary ventilation, body temperature and lactic acid concentration in the blood. The physiological method has established itself as the most accurate in rationing physical labour [1, 2].

The presented excursion on the methods used to standardize labour makes it possible to understand that significant costs and time are required to create appropriate databases. Therefore, another alternative to this approach is the use of already developed regulatory databases that can be adapted to the construction industry of the Republic of Iraq. In order to implement such an approach, it is necessary to analyze the available databases and establish such an up-to-date database that would have the greatest correspondence to the actual labour costs characteristic of the construction industry in the Republic of Iraq.

Consider the general features of building a base of labour costs based on the analysis of the following scientific publications [3–6]. In any country that has developed a database of labour costs, there are corresponding organizations that produce collections of standards with different intervals. In the UK, these are BCIS (Building Cost Information Service) and Davis Langdon, an AECOM Company (Spon's Price Books); in the USA, Compass International (Global Construction Costs Yearbook, etc.) and RSMeans (Building Construction Cost Data Book, etc.); in France — Groupe Moniteur (collection of Le coût des travaux de bâtiment, etc.), etc. In the USSR, all norms were drafted on the basis of data obtained by regulatory research stations, which were subsequently directed by the state into the construction

industry. In the Russian Federation, which is the successor of the USSR, norms are also introduced by the state, but in many cases they are advisory in nature.

In most countries, the development of cost indicators and indicators of labour costs is a separate type of commercial activity, and the price collections produced by them are applied on a voluntary basis. For example, RSMeans is a large commercial organization in the United States specializing in the development and production of a collection of construction cost indicators: single, elemental, and enlarged. The RSMeans compilation is published under the name Building Construction Cost Data and is annually released. It contains information about the unit performing the work, the output per 1 shift per 8 hours, labour costs in man-hours per unit of output, direct costs for materials, workers' wages, costs for machinery and equipment, and other indicators. The main purpose of the RSMeans collection is to form the cost of construction, and information on labour costs by type of work is informational. A distinctive feature of RSMeans collections is the lack of a technical part and a description of the quality requirements for the final product [7].

The French group of companies Groupe Moniteur publishes the collection *Le coût des travaux de bâtiment* (Cost of construction work). It is intended, first of all, to determine the cost of the project at the first stage of the investment process and is a set of aggregated prices. The collection includes 2 volumes — new construction and reconstruction. It is annually produced and it lists prices for each elementary type of work, indicators of labour costs, as well as cost indicators for expenditure items (auxiliary materials, devices, tools, etc.). A factor that distinguishes the French collection from the American collection is the presence of a brief technical part that describes the specific features of production processes.

The Finnish association "Construction Industry" created RATU standards, which are a card index of the standardization system for construction production, and they are made in the form of technological maps for construction work with a detailed description of the operations, and these standards contain enlarged and operational information on labour costs, the recommended composition of the link, the necessary documents and plans, the required materials, machines and equipment, safety measures, quality assurance measures, as well as special instructions and instructions. RATU cards are industrial and technological in nature, and data have been collected for them since the 70s by specialists of several major construction companies in Finland. With the development of engineering and technology, the file cabinet is being improved, and outdated standards are being replaced by new ones, but without a predetermined frequency¹. Several dozen construction compa-

nies and construction sites are constantly involved in collecting and replenishing the source data. The companies and construction sites participating in the study are located in various regions of Finland. Each rate is calculated based on data obtained from at least 10 objects. Moreover, its error does not exceed 10 %.

In Russia, the norms of labour costs are also production and are called "Unified Norms and Prices" which was later updated to be "State elemental estimated norms for the construction work" (SEENCW). All norms included in the SEENCW and RATU are determined by the normal conditions of work that do not take into account possible random fluctuations. Table 1 presents a comparison of regulatory documents that determine the norms of labour costs.

As a result of the presented analysis, it can be argued that the creation of a database of labour costs requires quite large resource costs. Therefore, for the Republic of Iraq, a less resource-intensive method can be recommended, namely, a regression method of creating a database, which is based on taking into account the actual labour costs of construction organizations.

Implementation of the proposed method can be carried out based on the usage of statistics on projects built in the republic, the information on which is reflected in the relevant executive documentation and supplemented by expert assessments of the conditions under which actual labour costs were received. From the point of view of the methodological implementation of the regression method, it is necessary to justify the regression procedure used in it. As the main alternatives, we consider the usage of traditional regression analysis and a more modern method based on the neural networks modeling.

MATERIALS AND METHODS

The problem of approximating the limited data obtained in solving complex problems can be solved both with the help of regression analysis and neural network modelling, built on the concepts presented in the monograph [8–13]. It is known that initially the multiple regression analysis method was focused on the description of linear models. To solve similar nonlinear models, the corresponding nonlinear form must be known and then individual models can be artificially reduced to a linear form, or a specific nonlinear regression algorithm should be developed for them [14]. Thus, to solve nonlinear problems by means of classical regression analysis, preliminary information on the form of the nonlinear connection of the desired function and its arguments is required.

In the general case, neural network modelling is used for a wide variety of applied [15]. In [16] and in the source², the author asks the question: "What is the difference between neural networks and statistics?"

¹ Porshneva L.G. *Finnish experience: cadres decide everything*. *Bulletin of the National Association of Builders*. 2011; 8(15):57-133. URL: http://sroamur.rf/doc/nostroy_bull/15.pdf (rus.).

² *What is the difference between neural networks and statistics?* URL: <https://helpiks.org/3-10999.html>

Table 1. Comparison of normative documents defining labour standards during construction work

Name of characteristic	SEENCW	RATU	RSMeans
Country	Russia	Finland	USA
Type of organization issuing the norm	State	State	Commercial
CHARACTER of the document	Production standards	Technological standards	Estimated Norms
Main purpose	Establishment of normative production of workers	Guide for the production of works	Pricing
Update Frequency	The latest database update dates back to 2022	Supplement occur as develop or improve technologies	Annually
Described Parameters	1. Scope of work. 2. The composition of the link. 3. Product meter. 4. Technical parameters of products. 5. The rate of time. 6. Rates (for workers)	1. Communication with other works. 2. Scope of work. 3. The indicators of labour costs enlarged and operational. 4. The composition of the link. 5. Required documents and plans. 6. The influence of variable factors on labour costs. 7. Consumption of materials. 8. Technology (operational with illustrations). 9. Required materials, machinery and equipment. 10. Safety. 11. Quality. Assurance Activities. 12. Special instructions	1. Type of work. 2. Technical parameters of products. 3. Product meter. 4. The composition of the link. 5. Daily output. 6. Labour costs. 7. Direct costs (materials, labour, equipment). 8. Cost taking into account overhead costs and profits (for subcontractor). 9. The coefficient on the general conditions of the work. 10. Overhead (for general contractor). 11. Profit (for general contractor)
Technical part	There is	There is	There is not
Product quality requirements	There is	There is	There is not

His answer boils down to the following conclusion: “When describing their methods, statistics appeal to formulas and equations, and neuro computing to a graphical description of neural architectures”. As a result, in the statistical approach, the main time for solving the problem is mainly spent on the analysis of pair correlations, while in neural network modelling, the main time is spent on training the networks.

It is believed that linear regression is useful for some tasks, but in many situations it is not effective, and polynomial regression is completely replaced by networks of high-order neurons. At the same time, many neural paradigms, such as Kohonen networks or the Boltzmann machine, have no direct analogues among statistical methods.

In the source³, James McCaffrey defines the goal of a regression problem — to predict the value of a numerical variable based on the values of one or more independent variables, called predictors, which can be either numerical or categorical. He identifies the fol-

lowing most common types of regression: polynomial regression, general linear model regression and neural network regression (NNR), and considers the latter type of regression to be the most powerful form.

In source⁴, the use of neural network technologies for processing the climate data table is described. For processing, we took the database on climate and vegetation of the Forest Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in Krasnoyarsk, built on the mean long-term values of the climate characteristics measured at 170 weather stations. For 121 weather stations, there were values of six climatic parameters, the rest in different combinations did not have values of one to three parameters. The aim of the work was to predict the missing values, which shows such an important additional possibility of using neural networks in the face of insufficient data.

Another positive feature of the usage of neural networks is the rejection of a specific approximating expression, since neural networks can approximate the desired response surfaces by any continuous func-

³ McCaffrey J. Test run — neural network regression. Test Run — Neural Network Regression. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2016/march/test-run-neural-network-regression>

⁴ Application of neural network technologies for processing the climate data table. URL: <https://studfile.net/preview/475257/page:23> (rus.).

tions. In [17, 18], a generalized approximation theorem was proved, according to which, using linear operations and cascading neurons, it is possible to obtain a device from an arbitrary nonlinear element that calculates any continuous function with some predetermined accuracy.

We show examples of the unambiguous and ambiguous choice of an approximating expression based on traditional regression analysis. It is good when the form of the model is logically predetermined by the correct statement of the problem. For example, in [19], a methodology was described for assessing the conformity of real indicators of the dynamics of wear of structures and the corresponding standard values. The form of the logistic curve was taken as the basis, and the assessment was carried out by calculating the deviation of the average relative error of the survey data from the calculated values obtained from the technical wear standards of residential buildings adopted in the Russian Federation. This example shows the adequate applicability of classical regression analysis, but there are other examples.

In [20], to show the decrease in shift production — y from the number of workers — x , a regression dependence of the form $y = a + b/x$ was used, in which a and b are the parameters of the desired regression (see Fig. 1).

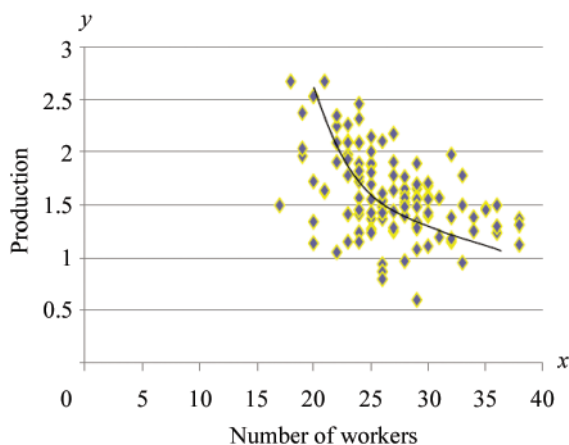


Fig. 1. Approximation of production depending on the number of workers

However, the presented dependence can equally well be replaced by an exponential form, which is the result of integrating a differential equation that takes into account a linear decrease in productivity from the number of workers.

Let us present another example showing the almost complete absence of physical meaning in the regression model. In [21], an equation is presented that determines the level of thermal protection of a blind section of the external walls when installing non-ventilated facade systems — K . It is also believed that the desired level of thermal protection is determined by the following regression expression and depends on 7 factors that measure the defective performance of work (from X_1 to X_7):

$$K = 0.66843 - 0.08368X_1 - 0.01626X_2 - 0.17707X_3 + 0.0287X_4 - 0.07676X_5 - 0.1673X_6 + 0.0829X_7 + 0.04412X_1X_3 - 0.02661X_1X_5 - 0.04712X_1X_6 + 0.0165X_1X_7 + 0.01603X_3X_4 - 0.0324X_3X_5 - 0.06979X_3X_6 + 0.0503X_3X_7 - 0.0334X_4X_5 + 0.02285X_4X_6, \quad (1)$$

where X_1 — gap at the junction of the insulation boards; X_2 — the gap at the junction of the bracket with a heater plate; X_3 — peeling of insulation boards from the base; X_4 — deviation from the design value of the thickness of the base; X_5 — deviation from the design value of the coefficient thermal conductivity of the base material; X_6 — deviation from the design value of the thickness of the insulating layer; X_7 — deviation from the design value of the coefficient thermal conductivity of the material of the insulating layer.

The inclusion in the regression formula (1) of the terms that determine the pairwise influence of certain factors on the final value of the thermal protection of the structure leads to inexplicable results. For example, an increase in the gap at the junction of the X_1 boards and the detachment of the X_3 insulation from the base reduce thermal protection, and the product of the same factors, on the contrary, increases thermal protection. Such physical inconsistencies are obtained with the purely formal application of such universal programs as the (STATISTICA).

As noted above, to describe the conditions for obtaining the values of actual labour costs, it is necessary to assess the compliance of the completed labour processes with their normative values. To do this, select the following parameters.

X_1 — assessment of the conformity of the numerical and qualification composition of labour resources to their normative values; X_2 — conformity assessment of labour supply with machinery and equipment; X_3 — assessment of the security of the labour process with structures, materials, products, etc.

The characteristics presented fully comply with the accounting of production conditions laid down in the most technologically sound standards, such as the Russian (SEENCW) and Finnish RATU. However, in a number of Russian regions, due to their harsh climate, various correction factors are additionally introduced [22], which can also be considered part of the regulatory framework for labour costs adopted in the Russian Federation. Therefore, given the influence of climatic factors on labour productivity in construction, it is advisable for the Republic of Iraq to introduce an additional factor — X_4 , which shows the degree of neutralization of weather conditions during the production process.

We draw attention to the fact that the presented estimated characteristics can only be quantified based on the application of expert methods. It is also necessary to take into account that in the problem under

consideration, there is no theoretical relationship between the norms of labour costs and the security parameters for their implementation. The difference between the neural network modelling method and the classical regression analysis lies precisely in the fact that it does not need to establish a priori any dependence, since this method latently takes into account any nonlinearity. However, for the correct implementation of the neural network modelling method, the construction of an adequate neural network architecture is required.

Artificial neural networks are built on the principle of the organization and functioning of biological neural networks. They are a system of connected and interacting simple processors, defined as artificial neurons. At the same time, the processors themselves are quite simple, but being connected to a large network are capable of performing very complex tasks. Carrying out the training procedure for neural networks makes it possible to get the right result even on the basis of data that were not in the training set.

Basically, neural networks are based on the image of a formal neuron, the scheme of which is shown in Fig. 2. A formal neuron has a group of so-called synapses that connect this neuron to the outputs of other neurons through unidirectional input connections, the signals from which are designated as x_i .

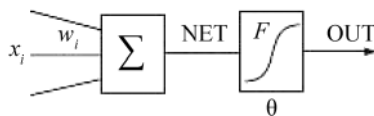


Fig. 2. Formal neuron

Each synapse is characterized by the value of the synoptic connection or its weight w_i . As a result, the general state of each neuron is determined by the weighted sum of its inputs:

$$\text{NET} = \sum w_i x_i. \quad (2)$$

A neuron has an axon that determines the output signal of a given neuron, which enters the synapses of the following neurons. The output of a neuron is a function of its state, which is called an activation function. Artificial neurons use various activation functions. Fig. 3 shows the main types of activation functions.

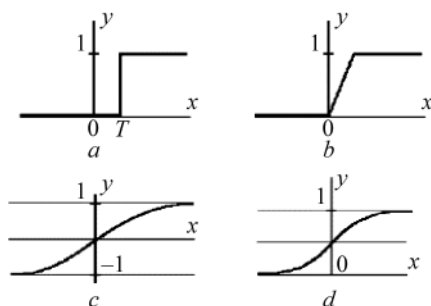


Fig. 3. Activation function used in neural networks

Fig. 3, *a* shows the threshold activation function that generates a single signal at the output when a certain threshold at the input is indicated by the letter T . Fig. 3, *b* shows a linear activation function that generates a signal proportional to the signal at the axon input. Fig. 3, *c* shows the activation function that generates an output signal determined by the hyperbolic tangent. Fig. 3, *d* shows the logistic activation function calculated by the equation:

$$Y = \frac{1}{1 + \text{Exp}(-\text{NET})}. \quad (3)$$

In the modern design of neural networks, other activation functions are also used, the features of the practical application of which can be found in the sources^{5, 6} and in [23–26]. The monograph [27] noted that the logistic activation function is the most popular, and therefore it can be used to solve our regression problem.

Using the logistic activation function, you can build the simplest network consisting of one neuron. The signals x_i are applied to the inputs of the formal neuron, which are summed with the corresponding weights in the NET operator, which integrates the weighted signals according to formula (2), and the activation function chosen by us follows the adder. As a result of using the single-neural model, the functional relationship between the output and the inputs will have a non-linear representation, determined by the following formula:

$$Y = \frac{1}{1 + \text{Exp}(-w_1 x_1 - w_2 x_2 - w_3 x_3 - w_4 x_4)}. \quad (4)$$

The solution to the problem of finding the set of weights w_i occurs in the training mode on a priori set sample size. In this case, the initial values of unknown weights are calculated using random numbers evenly distributed in the range from -0.5 to $+0.5$. This is followed by an iterative procedure, which is based on the determination of the output error, and then, based on the obtained output error, the weights are adjusted using the inverse error distribution algorithm. The iterative procedure ends when a certain result is determined by the network designer, for example, when a certain number of steps are exhausted, a given error is achieved, etc.

However, if we use the simplest one-neural network and the linear activation function for the solution, then the problem of finding unknown weights can be solved in a more efficient way using the least squares method. When using the activation function of the logistic type, it is also possible to reduce the problem to the least squares method by linearizing the problem

⁵ Deep learning. URL: <https://www.deeplearningbook.org/>

⁶ CS-231N winter 2016 (Convolutional Neural Networks for visual recognition). CS231n-Andrej_Karpathy_Stanford. URL: <http://cs231n.stanford.edu/2016/>

by applying the following change of the desired variable Y :

$$Z = \ln \frac{Y}{1 - Y}. \quad (5)$$

Then, in this case, the solution of the problem will be reduced to a similar nonlinear approximation problem using a priori given form of equation (4).

The most used family in direct distribution networks are multilayer perceptrons, in which layered neurons have unidirectional connections between layers. Fig. 4 shows a two-layer perceptron, which we used as one of the networks, in which signals simulating independent variables are supplied to the neuron inputs, and a signal is removed from the output neuron that provides an approximation of the functional connection of type $Y(X_1, X_2, X_3, X_4)$.

Since neural networks work with numerical data lying in different ranges, normalization is carried out for all variables, which brings all the inputs and outputs to a single range from 0 to 1. If we denote the normalized parameter of the input value by L , then its value will be calculated according to the formula:

$$L_i = \frac{X_i - \min X_i}{\max X_i - \min X_i}. \quad (6)$$

RESULTS OF THE RESEARCH

The input and output data are normalized over the entire training array, an example of which is presented in Table 2.

The first four rows of Table 2 show the results of entering 10 data options on the conditions of security

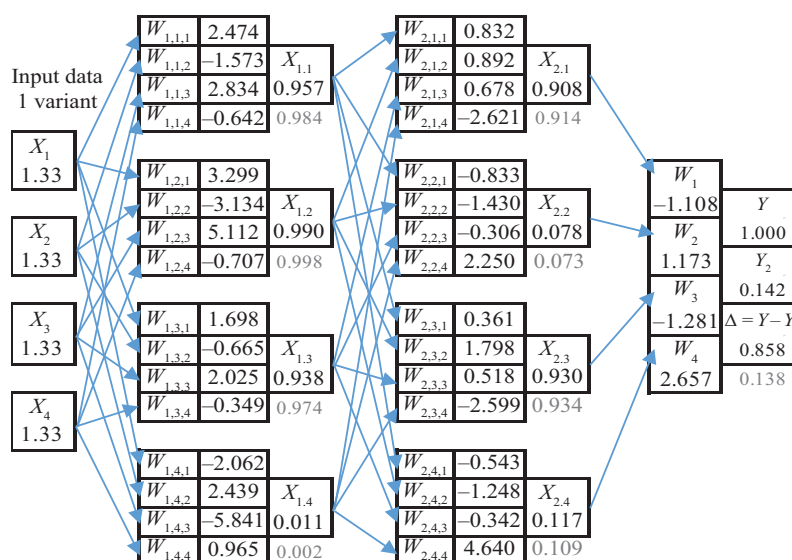


Fig. 4. Two-layer perceptron approximator $Y(X_1, X_2, X_3, X_4)$

Table 2. Example training array consisting of 10 data options

Option number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Workers X_1 , %	60	50	50	60	60	70	70	75	75	80
Machines X_2 , %	75	50	60	60	65	70	70	70	80	80
Materials X_3 , %	55	50	60	60	60	60	65	70	70	80
Weather X_4 , %	65	50	70	70	75	75	80	80	80	80
Standardization X_1	0.33	0.00	0.00	0.33	0.33	0.67	0.67	0.83	0.83	1.00
Standardization X_2	0.83	0.00	0.33	0.33	0.50	0.67	0.67	0.67	1.00	1.00
Standardization X_3	0.17	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.50	0.67	0.67	1.00
Standardization X_4	0.50	0.00	0.67	0.67	0.83	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00
Y , person cm/m ³	0.75	0.72	0.705	0.69	0.68	0.66	0.645	0.63	0.615	0.6
Standardization Y	1.00	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00
Yield calculation — Y_1	0.93	0.85	0.72	0.43	0.57	0.42	0.25	0.13	0.20	0.09
Yield calculation — Y_2	0.93	0.81	0.68	0.35	0.56	0.40	0.23	0.16	0.19	0.14
Yield calculation — Y_3	0.90	0.80	0.68	0.43	0.55	0.32	0.35	0.13	0.14	0.12

of actual labour costs (ALC). The next four rows of Table 2 show the results of calculating the normalized values of the data on the security of regulatory conditions leading to the receipt of ALC. The question of how many observations you need to have to train the network is often difficult. In the general survey on neural networks presented in the source⁷, the following heuristic rule is given: the number of observations should be ten times the number of connections in the network. For our purposes, in view of the informational complexity of the primary problem, solved on the basis of collecting a large number of statistical data, the training array is determined by 10 options. This number of options satisfies the lower boundary of the representativeness of the data obtained in the process of creating the Finnish labour standards RATU.

After the normalized values that determine the conditions for the process, Table 2 presents a line that directly shows the values of the ALC determined by the letter — Y , and the next line presents its normalized values, which are calculated by a formula similar to formula (6). In the future, the actual data on labour costs will play the role of a “teacher”, with the help of which weight factors are selected for all neurons of the adopted network.

As noted earlier, the ability to learn is a fundamental property of the neural network, and the learning process itself can be considered as setting up the network architecture and connection weights for the effective implementation of the regression task. There are different models that define the learning algorithm. In the case of training: “with a teacher”, the neural network has the correct answers, that is, the known network outputs (ALC) for each variant of the input data. It has been empirically established for networks working with a “teacher” that the optimal number of hidden neurons is much smaller than when using training without a “teacher” [28].

In Fig. 4 all calculated weighting factors are represented by three indices, the first index determines the number of the network layer, the second — the number of the neuron in the layer, the third — the serial number of the input of a particular neuron. In the output layer, consisting of a single neuron, the corresponding weights are determined by a single index. In Fig. 4 the network output is represented by a set of normalized values obtained on the basis of the calculated values of the network output and their differences, by which all weighting factors are adjusted. When modifying the scales, the principle of error correction is used, which provides a gradual reduction in error.

As the error function, the sum of the squared errors is most often taken, i.e. when all errors of the output elements for all observations are squared and then summed. The best-known version of the neural net-

work learning algorithm is called the back propagation algorithm. In this algorithm, the error surface gradient vector is calculated, which indicates the direction of the shortest descent along the surface from a given point, and when moving along it, the error decreases.

A certain difficulty is the question of how to take the length of the calculation step, which determines its speed. To find the right speed in complex (from a computational point of view) networks, adaptive algorithms for dynamic speed control are used [29–31]. For example, with a long stride length, convergence will be faster, but there is a danger of jumping over the solution or (if the error surface has a particularly elaborate shape) to go in the wrong direction. It is believed that the right choice of learning speed depends on a specific task and is usually carried out empirically. For problems solved on the basis of statistics on labour costs, response surfaces can be quite complex, but without the presence of various kinds of singularities. Guided by the analysis made, we can conclude that the step length should be determined empirically, based on an acceptable training time. The entire learning process stops either when a certain number of steps are taken, or when the error reaches a certain level of smallness, or when the error stops decreasing.

Thus, the user can choose the desired stopping condition.

In the monograph [27], a recommendation is made regarding the equality of the number of neurons in the input layer to the number of input parameters. The following is a recommendation regarding the adequacy of the three hidden layers with a sequential decrease in the number of neurons in the layer as they move away from the entrance. However, another observation is also given: “Sometimes the best results are obtained if the number of parameters in all hidden layers is the same, but not reduced”. There is one more rule of thumb: “The smaller the network, the fewer local minima in it, and in a large network of local minima there can be many”.

We proceed to show the specific results of using a multilayer perceptron, the scheme and parameters of which are based on the scientific and practical recommendations considered above. The initial data presented in Table 2 were introduced into three types of neural networks: a single-layer, two-layer, and three-layer networks, which are marked in Table 3 by the corresponding indices.

Table 3. The results of the calculation of labour costs

Number of layers	Y	ρ	Z	ρ
1	0.540	0.96	0.556	0.96
2	0.554	0.94	0.556	0.96
3	0.556	0.97	0.557	0.97

The results of calculating labour costs for different networks turned out to be fairly close, and their relative error did not exceed 1 %. Together, the calcula-

⁷ Application of neural network technologies for processing the climate data table. URL: <https://studfile.net/preview/475257/page:23> (rus.).

tion showed that the coefficient of pair correlation of the results of a three-layer network with actual data was the highest value $\rho = 0.97$. Thus, based on the Table 3 and other similar experimental data, a three-layer network can be recommended for use.

The networks under consideration were tested for obtaining labour costs based on the results of introducing production standards, which, as you know, are the inverse of labour costs. As a result of the experiment, the actual workings were introduced instead of the actual labour costs, and the inverse value was calculated using the norm of the workings obtained as a result of neural network modelling. An example of the final discrepancy is presented in Table 3 in the column under the letter Z. As can be seen from the data in Table 3, the results of calculating direct and inverse values practically coincide, and the corresponding pair correlation coefficients have values close to maximum. Thus, the “universality” of the use of neural network regression to nonlinear dependence is “experimentally” confirmed.

Common characteristics for modelling networks are: the volume of the training sample, consisting of 10 options, the iteration step, which determines the calculation time and is assumed to be 0.2 and the total number of iterations is 10,000. At the same time, the calculation time carried out in the macro program and implemented in the environment Excel spreadsheet processor, less than one second.

The presented characteristics and the experiments associated with them allow us to adjust the parameters that determine the estimated time, that is, the speed and volume of iterations. Table 4 shows the network testing data associated with the estimation of the reproducibility error of the calculation results.

Table 4. Network test data for reproducibility of results

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Y1	541	541	540	543	541	543	544	543	543
Y2	551	546	550	550	551	549	551	551	548
Y3	559	567	556	568	564	562	556	565	569
N	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Y1	543	543	542	542	542	540	542	541	543
Y2	547	551	551	553	554	548	539	554	551
Y3	566	557	571	555	567	552	553	560	569

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the general case, to build an adequate neural network, it is necessary to use many neurons that form such a property of the network as its multilayer. By definition, an artificial neural network layer is a set of neurons that simultaneously receive signals from other neurons in a given network at each time step. As a result of the functioning of the multilayer network, the interaction of neurons occurs in layers. The choice of artificial

neural network architecture is determined by a specific task. Moreover, the architecture of the neural network can be considered as a directed graph having weighted connections between nodes, which are used as artificial neurons, shown in Fig. 2. According to the connection architecture, neural networks are divided into direct distribution networks in which graphs do not have loops, and recurrent networks which include feedbacks. Recursive networks are dynamic, since, due to feedbacks, the inputs of neurons are modified in them, which leads to a change in the state of the network. Direct distribution networks are static in the sense that for a given vector of input values they produce one set of output values that are not dependent on the previous state of the network. It follows that to solve the problem posed by us, a direct distribution network is applicable.

Based on the processing of the data presented, the value of the coefficient of variation was less than 2 %, and this is quite enough to determine the standard of labour costs. As mentioned above, the margin of error established by the developers of the Finnish labour standards RATU is limited to 10 %. A much larger error in the result of the regression determination of labour costs is introduced by the error in determining percent compliance with the regulatory conditions for the implementation of the labour process. For example, if we reduce all the initial data for assessing the percent of compliance with regulatory conditions by 10 %, then the calculated standard of labour costs will decrease by about the same amount. It follows that in order to obtain more relevant results when using the proposed method, it is necessary to combine it with effective methods of expert assessments, one of the variants based on the processing of the data presented, the value of the coefficient of variation was less than 2 %, and this is quite enough to determine the standard of labour costs. As mentioned above, the margin of error established by the developers of the Finnish labour standards RATU is limited to 10 %. A much larger error in the result of the regression determination of labour costs is introduced by the error in determining percent compliance with the regulatory conditions for the implementation of the labour process. For example, if we reduce all the initial data for assessing the percent of compliance with regulatory conditions by 10 %, then the calculated standard of labour costs will decrease by about the same amount. It follows that in order to obtain more relevant results when using the proposed method, it is necessary to combine it with effective methods of expert assessments, one of the variants of which is the method of stochastic qualimetry [32, 33].

As a preamble, we conclude with a quote from the monograph [27]. “The price that you have to pay for wider (non-linear) modelling capabilities using neural networks is that, by adjusting the network to minimize errors, we can never be sure that it’s impossible to make even less mistake”. This warning in no way

reduces the efficiency of using neural networks, since there are sufficiently proven algorithms for verifying approximated data.

As a generalized conclusion on the practical result of the presented development, we can present a step-by-step methodology for the regression of the formation of labour costs for the selected type of work, which reduces to the following elementary procedures.

- A lot of construction objects are determined, on which there is executive documentation for the chosen type of work.

- According to the executive documentation for the selected type of work, labour costs are determined associated with a unit volume of work performed, which corresponds to the values of actual labour costs.

- According to the adopted scale, which should be uniform for the entire set of objects, the security of the actual conditions of work is assessed.

- Taking into account the normalization defined by formula (6), a training array of normalized data is formed.

- Next, the training array is processed in a neural network formed taking into account the characteristics described above, and as a result, data are obtained on approximating the dependence of labour costs on the conditions for their receipt.

- The final part of the regression reproduction of the norm of labour costs is based on the extrapolation procedure, which takes into account the full (100 %) security of meeting the conditions for the organization of the labour process.

REFERENCES

1. Barnes R. *Motion and time study: Design and measurement of Work*. New York, Wiley, 1980; 714.
2. Khoshnaw Y.B.H., Bolotin S., Bagulya V., Bohan H. Algorithm for neural network regeneration of labor costs based on the assessment of relevant construction data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(6):062003. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062003
3. Bolotin S.A., Kotovskaya M.A. Analysis of European and Russian normative bases of labour costs in regard to construction scheduling. *Bulletin of Civil Engineers*. 2013; 2(37):98-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20169688> (rus.).
4. Romanovich M.A., Musorina T.Z., Starshinova E.D., Sushkov N.N. Normative bases of labor costs influence on construction duration and crew formation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 7(58):74-89. DOI: 10.18720/CUBS.58.6. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7\(58\)/06_romano_vich_58.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7(58)/06_romano_vich_58.pdf)
5. Matveev M.Yu., Solin A.A. Analytical comparison of domestic and foreign standards in construction. *Innovations in the sectors of the national economy as a factor in solving socio-economic problems of the present : collection of reports and materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2012; 1:205-222. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23112717> (rus.).
6. Potudanskaya V.F., Gorskina L.S. Once again about the principles of labor rationing. *Labor Economics*. 2017; 3(4):197-208. DOI: 10.18334/et.4.3.38201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30108810> (rus.).
7. Solin A.A. Comparative analysis of domestic and foreign estimated standards. *Construction. Economics and Management*. 2011; 1:46-51. (rus.).
8. Callan R. *The essence of neural networks*. Prentice Hall Europe, 1999; 232.
9. Guo M., Manzoni A., Amendt M., Conti P., Hesthaven J.S. Multi-fidelity regression using artificial neural networks: Efficient approximation of parameter-dependent output quantities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022; 389:114378. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114378
10. Chen Y., Song L., Liu Y., Yang L., Li D. A review of the artificial neural network models for water quality prediction. *Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020; 10(17):5776. DOI: 10.18720/CUBS.58.6
11. Choudhury S.J., Pal N.R. Imputation of missing data with neural networks for classification. *Knowledge-Based Systems*. 2019; 182:104838. DOI: 10.1016/j.knosys.2019.07.009
12. Fischer M.M. *Neural networks. A class of flexible non-linear models for regression and classification : Handbook of Research Methods and Applications in Economic Geography*. Cheltenham, Edward Elgar publishing. Vol. 172. 2015; 172-92.
13. Illarionovna P.A., Yuryevna L.O. Comparative analysis of the use of neural networks for function approximation. *Science Time*. 2015; 5(17):314-320. (rus.).
14. Draper N.R., Smith H. *Applied regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1998; 706.
15. Boussabaine A.H. The use of artificial neural networks in construction management : a review. *Construction Management and Economics*. Routledge, 1996; 14(5):427-436. DOI: 10.1080/014461996373296
16. Du K.-L., Swamy M.N. *Neural Networks and Statistical Learning*. London, Springer London, 2019; 824.
17. Galizdra V.I., Babaev Sh.B. Neural networks and data approximation. *Scientific and educational problems of civil protection*. 2011; 3:35-43. (rus.).
18. Gorban A.N. Generalized approximation theorem and computational capabilities of neural networks.

Siberian Journal of Computational Mathematics. 1998; 1(1):12-24. (rus.).

19. Rakovsky V.I., Popova O.N. Optimization of reproduction processes of renewal of city housing stock by the use of methods of mathematical simulation. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:32-34. (rus.).

20. Romanovich M.A. Mathematical modeling of worker's qualification. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014; 12(95):135-140. (rus.).

21. Rusanov A.E. Research of influence of civil engineering work defects on heat-shielding properties of external protecting designs on the example of curtain wall systems. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2013; 13(2):38-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20920880> (rus.).

22. Klimov S.E. *Development of the theory and improvement of the methodology for scheduling construction in the harsh conditions of the Far North : dissertation ... Dr. Econ. Sciences*. SPB., 2005; 430. (rus.).

23. Abd Elaziz M., Dahou A., Abualigah L., Yu L., Alshinwan M., Khasawneh A. et al. Advanced metaheuristic optimization techniques in applications of deep neural networks : a review. *Neural Computing and Applications*. 2021; 33(21):14079-14099. DOI: 10.1007/s00521-021-05960-5

24. Wang Y., Li Y., Song Y., Rong X. The influence of the activation function in a convolution neural network model of facial expression recognition. *Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020; 10(5):1897. DOI: 10.3390/app10051897

25. Nwankpa C., Ijomah W., Gachagan A., Marshall S. Activation functions: Comparison of trends in practice and research for deep learning. *arXiv preprint*. 1811.03378. 2018; 1-20. DOI: 10.48550/arXiv.1811.03378

26. Lipton Z.C., Berkowitz J., Elkan C. A critical review of recurrent neural networks for sequence learning. *arXiv preprint arXiv:1506.00019*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.00019

27. Patterson J., Gibson A. *Deep learning: A practitioner's approach*. Sebastopol, CA, O'Reilly, 2017; 530.

28. Montavon Gr., Orr G.B., Müller K.-R. *Neural networks tricks of the Trade*. Heidelberg, Springer, 2012; 432.

29. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization. *Journal of Machine Learning Research*. 2011;12:2121-2159.

30. Fang R., Li D., Shen X. Distributed online adaptive subgradient optimization with dynamic bound of learning rate over time varying networks. *IET Control Theory & Applications*. 2022; 16(18). DOI: 10.1049/cth2.12

31. Mamalis T., Stipanovic D., Voulgaris P. Stochastic learning rate optimization in the stochastic approximation and online learning settings. *2022 American Control Conference (ACC)*. 2022. DOI: 10.23919/ACC53348.2022.9867565

32. Bolotin S.A., Dadar A.Kh. Determination of the error of the qualimetric estimation of the weights of additive indicators of the quality of calendar construction plans. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010; 2(614). (rus.).

33. Bolotin S.A., Dadar A.Kh. Choosing the sensitivity of the scale for evaluating the quality of the construction organization. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010; 9(621): 34-38. (rus.).

Received August 16, 2022.

Adopted in revised form on March 10, 2023.

Approved for publication on March 23, 2023.

BIONOTES: **Khoshnaw Y.B. Hussein** — postgraduate student; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; yousif.babakr@gmail.com;

Sergey A. Bolotin — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 247664; sbolotin@mail.ru;

Nadim Q.R. Huraini — postgraduate student; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1143546; nadimhuraini@gmail.com;

Haitham Boxan — postgraduate student; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; lecturer; **Thi-Qar University**; Republic of Iraq; haitham_kh9@yahoo.com.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Barnes R. Motion and time study: Design and measurement of Work. New York : Wiley, 1980. 714 p.
2. Khoshnaw Y.B.H., Bolotin S., Bagulya V., Bohan H. Algorithm for neural network regeneration of labor costs based on the assessment of relevant construction data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 6. P. 062003. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062003
3. Болотин С.А., Котовская М.А. Анализ европейской и российской нормативных баз трудовых затрат применительно к календарному планированию строительства // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 98–103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20169688>
4. Romanovich M.A., Musorina T.Z., Starshinova E.D., Sushkov N.N. Normative bases of labor costs influence on construction duration and crew forming // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. Вып. 7 (58). С. 74–89. DOI: 10.18720/CUBS.58.6. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7\(58\)/06_romanovich_58.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7(58)/06_romanovich_58.pdf)
5. Матвеев М.Ю., Солин А.А. Аналитическое сравнение отечественных и зарубежных нормативов в строительстве // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. II Междунар. науч.-практ. конф. М., 2012. Т. 1. С. 205–222. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23112717>
6. Потуданская В.Ф., Горскина Л.С. Еще раз о принципах нормирования труда // Экономика труда. 2017. № 3 (4). С. 197–208. DOI: 10.18334/et.4.3.38201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30108810>
7. Солин А.А. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных сметных нормативов // Строительство. Экономика и управление. 2011. № 1. С. 46–51.
8. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей : пер. с англ. М. : Вильямс, 2001. 287 с.
9. Guo M., Manzoni A., Amendt M., Conti P., Hesthaven J.S. Multi-fidelity regression using artificial neural networks: Efficient approximation of parameter-dependent output quantities // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022. Vol. 389. P. 114378. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114378
10. Chen Y., Song L., Liu Y., Yang L., Li D. A review of the artificial neural network models for water quality prediction // Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 10. Issue 17. P. 5776. DOI: 10.18720/CUBS.58.6
11. Choudhury S.J., Pal N.R. Imputation of missing data with neural networks for classification // Knowledge-Based Systems. 2019. Vol. 182. P. 104838. DOI: 10.1016/j.knosys.2019.07.009
12. Fischer M.M. Neural networks. A class of flexible non-linear models for regression and classification : Handbook of Research Methods and Applications in Economic Geography. Vol. 172. Cheltenham : Edward Elgar Publishing, 2015. 192 p.
13. Илларионовна П.А., Юрьевна Л.О. Сравнительный анализ применения нейронных сетей для аппроксимации функций // Science Time. 2015. № 5 (17). С. 314–320.
14. Draper N.R., Smith H. Applied regression analysis. New York : John Wiley & Sons, 1998. 706 p.
15. Boussabaine A.H. The use of artificial neural networks in construction management: a review // Construction Management and Economics. 1996. Vol. 14. Issue 5. Pp. 427–436. DOI: 10.1080/014461996373296
16. Du K.-L., Swamy M.N. Neural networks and statistical learning. London : Springer London, 2019. 824 p.
17. Гализдра В.И., Бабаев Ш.Б. Нейронные сети и аппроксимация данных // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2011. № 3. С. 35–43.
18. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной математики. 1998. Т. 1. № 1. С. 12–24.
19. Раковский В.И., Попова О.Н. Оптимизация воспроизводственных процессов обновления жилищного фонда города посредством применения методов математического моделирования // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 32–34.
20. Романович М.А. Математическое моделирование квалификации рабочего // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12 (95). С. 135–140.
21. Русанов А.Е. Исследование влияния дефектов строительных работ на теплозащитные свойства фрагмента ограждающей конструкции с устройством навесной фасадной системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. № 2. С. 38–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20920880>
22. Климов С.Э. Развитие теории и совершенствование методологии календарного планирования строительства в суровых условиях Крайнего Севера : дис. ... д-ра экон. наук. СПб., 2005. 430 с.
23. Abd Elaziz M., Dahou A., Abualigah L., Yu L., Alshinwan M., Khasawneh A. et al. Advanced meta-heuristic optimization techniques in applications of deep neural networks: a review // Neural Computing and Applications. 2021. Vol. 33. Issue 21. Pp. 14079–14099. DOI: 10.1007/s00521-021-05960-5
24. Wang Y., Li Y., Song Y., Rong X. The influence of the activation function in a convolution neural network model of facial expression recognition // Ap-

plied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 10. Issue 5. P. 1897. DOI: 10.3390/app10051897

25. *Nwankpa C., Ijomah W., Gachagan A., Marshall S.* Activation functions: Comparison of trends in practice and research for deep learning // arXiv preprint.1811.03378. 2018. Pp. 1–20. DOI: 10.48550/arXiv.1811.03378

26. *Lipton Z.C., Berkowitz J., Elkan C.A.* Critical review of recurrent neural networks for sequence learning // arXiv preprint arXiv:1506.00019. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.00019

27. *Patterson J., Gibson A.* Deep learning: A practitioner's approach. Sebastopol, CA : O'Reilly, 2017. 530 p.

28. *Montavon G., Orr G., Müller K.-R.* Neural networks: Tricks of the Trade. Heidelberg : Springer, 2012. 432 p.

29. *Duchi J., Hazan E., Singer Y.* Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic

optimization // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. Pp. 2121–2159.

30. *Fang R., Li D., Shen X.* Distributed online adaptive subgradient optimization with dynamic bound of learning rate over time — varying networks // IET Control Theory & Applications. 2022. Vol. 16 (18). DOI: 10.1049/cth2.12

31. *Mamalis T., Stipanovic D., Voulgaris P.* Stochastic learning rate optimization in the stochastic approximation and online learning settings // 2022 American Control Conference (ACC). 2022. DOI: 10.23919/ACC53348.2022.9867565

32. *Болотин С.А., Дадар А.Х.* Определение погрешности квалитетической оценки весов аддитивных показателей качества календарных планов строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 2 (614).

33. *Болотин С.А., Дадар А.Х.* Выбор чувствительности шкалы для оценки качества организации строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 9 (621). С. 34–38.

Поступила в редакцию 16 августа 2022 г.

Принята в доработанном виде 10 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Хошнав Юсиф Бабакар Хуссейн** — аспирант; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; yousif.babakr@gmail.com;

Сергей Алексеевич Болотин — доктор технических наук, профессор; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 247664; sbolotin@mail.ru;

Надим К.Р. Хурейни — аспирант; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1143546; nadimhuraini@gmail.com;

Хайтам Бохан — аспирант; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; преподаватель; **Университет Ди-Кар;** Республика Ирак; haitham_kh9@yahoo.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен **в соответствии со стандартом IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi notes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

