

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 9/2022
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 9
2022**

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

Сквозной номер 166

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 9
2022**

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. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	28.09.2022.
Подписан в свет	30.09.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,60. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 287

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

Йост Вальравен, проф., д-р инж. (технические науки, железобетонные конструкции), 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), Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

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

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

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Ольга Григорьевна Горюнова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

Александр Романович Туснин, д-р техн. наук., доц., 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, ВРИО директора, 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

Александр Витальевич Гинзбург, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных

наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный 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, 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:	28.09.2022

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Хью Хынг Дам

Взаимодействие барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязкопластических свойств. 1135

М.М. Тамов, О.В. Руденко, С.В. Усанов

Нейросетевое прогнозирование сопротивления поперечной силе армированных бетонных двутавровых балок 1145

А.И. Притыкин

**Prediction of the castellated beams deflections
(Определение прогибов перфорированных балок) 1160**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Г.И. Яковлев, Н.В. Хохряков, И.С. Полянских, З. Орбан, А.Н. Гуменюк

Применение квантово-химического моделирования для определения механизма электрической проводимости в силикатных матрицах 1175

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Е.В. Сысоева, М.О. Гельманова, М.Ю. Слесарев

Методика обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами 1187

Хайдер Аббас Ашур АлАраза, Харун Махмуд

**A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load
(Параметрическое исследование прогиба слоев бетонного покрытия взлетно-посадочной полосы при ударной нагрузке) 1206**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Л.С. Абдуламир, В.А. Орлов, Н.Т. Джумагулова

Гидравлические исследования напорных труб из различных материалов 1218

С.Е. Беднарук, А.В. Мاستрюкова, В.В. Чуканов

**Алгоритмы автоматизации расчета характеристик водных объектов
на примере Волго-Ахтубинской поймы 1231**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

П.А. Журавлев, С.Б. Сборщиков

Сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки 1240

Д.З. Искандаров, С.М. Бороздина

Метод многомерного шкалирования для оценки эффективности взаимодействия предприятий инвестиционно-строительной сферы и особых экономических зон в аспекте совершенствования финансового и инновационного потенциала строительной отрасли 1250

В.В. Глазкова

Стейкхолдерский подход к инновационному развитию единых теплоснабжающих организаций 1264

Требования к оформлению научной статьи 1276

CONTENTS

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

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Hung Huu Dam

Interaction between a barrette and multilayered surrounding and underlying soils, taking into account their elastic and elastic-viscoplastic properties 1135

Murat M. Tamov, Olga V. Rudenko, Sergey V. Usanov

Neural network prediction of web-crushing strength of i-shaped reinforced concrete beams 1145

Alexej I. Pritykin

Prediction of the castellated beams deflections 1160

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Grigoriy I. Yakovlev, Nikolaj V. Khokhriakov, Irina S. Polyanskikh, Zoltan Orban, Alexander N. Gumeniuk

Applying the quantum chemical simulation to describe electrical conductivity in silicate-based materials 1175

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Elena V. Sysoeva, Margarita O. Gelmanova, Mikhail Yu. Slesarev

Methodology for substantiating the effectiveness of dust capture by “green” roofs 1187

Hayder Abbas Ashour AlAraza, Kharun Mahmud

A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load 1206

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Layth Saeed Abdulameer, Vladimir A. Orlov, Nazira T. Dzhumagulova

Hydraulic studies of pressure pipes made of various materials 1218

Sergey E. Bednaruk, Alina V. Mastryukova, Vitaliy V. Chukanov

Automation algorithms for water bodies characteristics calculation on the example of the Volga-Akhtuba floodplain. 1231

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Pavel A. Zhuravlev, Sergej B. Sborshchikov

A consolidated parametric model designated for the arrangement of reengineering of territories and built-up areas 1240

Daler Z. Iskandarov, Svetlana M. Borozdina

Method of multidimensional scaling for evaluating the effectiveness of interaction between investment and construction sector enterprises and special economic zones in the aspect of improving the financial and innovative potential of construction industry 1250

Valeria V. Glazkova

Stakeholder approach to the innovative development of unified heat supply organizations 1264

Requirements for research paper design 1276

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);
- 2.1.7. 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);
- 05.02.22. Организация производства (по отраслям) (технические науки);
- 05.23.07. Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.16. Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 08.00.05. Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки).

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:
«Разработка научных основ получения долговечных, пожаробезопасных эпоксидных композиционных материалов
строительного назначения».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета
НИУ МГСУ 18.10.2022 г. в 14:00.

С порядком проведения конкурсного отбора можно ознакомиться
на официальном сайте НИУ МГСУ (mgsu.ru).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144

Взаимодействие барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязкопластических свойств

Завен Григорьевич Тер-Мартirosян, Армен Завенович Тер-Мартirosян,
Хыу Хынг Дам

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При взаимодействии барреты со слабым неоднородным окружающим и подстилающим грунтами осадка барреты может развиваться длительное время. Прогноз осадок барреты во времени имеет большое значение при проектировании барретного фундамента на глинистых грунтах. Необходимо рассматривать процесс развития осадок барреты как реологический. Изложены постановка и решение задачи о взаимодействии барретного фундамента с многослойным окружающим и подстилающим грунтами при учете их упруго-вязкопластических свойств. Показано, что осадка основания развивается в зависимости от вязкости окружающего грунта.

Материалы и методы. Задача рассматривалась в линейной постановке. Решение приведено аналитическим методом. Для описания процесса развития осадок во времени использованы постоянные и переменные коэффициенты вязкости грунта.

Результаты. Получены выражения для определения осадки, усилий на боковой поверхности, а также на пяте барреты. Показаны зависимости осадки и усилий на нижнем конце барреты от времени при учете упруго-вязкопластических свойств массива окружающего грунта. Приведены графики кривых зависимостей осадки барреты и усилия под пятой барреты от времени при различных значениях коэффициентов вязкости грунта.

Выводы. Данные решения могут быть применены для определения вертикального перемещения барреты при взаимодействии с неоднородным грунтовым массивом. Коэффициент вязкости окружающего грунта оказывает значительное влияние на скорость развития напряжения под нижним концом барреты. Учет увеличения во времени коэффициента вязкости воздействует на время стабилизации осадки, а также давление под нижним концом барреты. Допустим прогноз стабилизированной осадки барреты при взаимодействии с упруго-вязкопластическим грунтовым массивом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: взаимодействие барреты, многослойный окружающий и подстилающий грунты, упруго-вязкопластическая модель, аналитический метод, реологические свойства, стабилизированная осадка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Хыу Хынг Дам. Взаимодействие барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязкопластических свойств // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1135–1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144

Автор, ответственный за переписку: Хыу Хынг Дам, hungdh1992@gmail.com.

Interaction between a barrette and multilayered surrounding and underlying soils, taking into account their elastic and elastic-viscoplastic properties

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Hung Huu Dam
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Upon interaction between a single barrette with underlying and loose surrounding soils the settlement of the barrette can occur for a long period of time. Therefore, the prediction of barrette settlement in time is significantly essential for building, foundation analysis and design under such geological conditions. As a result, it is vitally necessary

to consider rheological processes of soils the cause of the change of barrette settlement in time. In order to clarify the abovementioned problem the setting and solutions to the problem of the interaction between a single barrette and elastic-viscoplastic surrounding and underlying soil are presented. The result indicates that the viscosity of surrounding soils greatly affects time-dependent settlement curves of a vertically loaded barrette.

Materials and methods. The problem is considered in a linear formulation. The solution is acquired in analytical method. To figure out the changing in time process of barrette settlement, constant and variable coefficients of viscosity of soils are applied.

Results. The expressions are obtained to determine barrette settlement, friction forces on side surfaces of the barrette and reaction forces under the barrette heel. The relationship between the reaction forces under barrette toe; barrette settlement and the time are derived in regard to elastic-viscoplasticity of multilayered surrounding soil. Acquired results are presented by graphs in the article. The graphs demonstrating abovementioned relationships are provided according to various values of constant and variable coefficients of viscosity of soils.

Conclusions. The acquired solution can be applied to determine vertical displacement of a barrette when interacting with an elastic as well as elastic-viscoplastic heterogeneous soil mass. Coefficients of viscosity of surrounding soil have a significant effect on the rate of barrette settlement and stress under the barrette heel. Taking into account the increase in the coefficients of soil viscosity over time affects greatly the values of long-term settlement of the barrette, as well as pressure under the barrette toe. As a result, it is possible to predict the values of stabilized settlement as well as long-term bearing capacity of a barrette interacting with an elastic-viscoplastic heterogeneous soil mass.

KEYWORDS: barrette interaction, multilayered soils, heterogeneous soil mass, elastic-viscoplasticity, rheological properties, settlement rate

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Hung Huu Dam. Interaction between a barrette and multilayered surrounding and underlying soils, taking into account their elastic and elastic-viscoplastic properties. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1135-1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144 (rus.).

Corresponding author: Hung Huu Dam, damhuuhung1992@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз развития осадок грунтового основания во времени имеет существенное значение при проектировании фундаментов, в том числе барретных фундаментов по второй группе предельного состояния. Во многих нормативных документах оценка окончательного значения осадки свайных фундаментов проводится без учета развития деформации грунтового основания во времени за счет их реологических свойств. Для многих расчетов процесс консолидации рассматривается как фактор времени, влияющий на прогноз осадок грунтового основания [1]. Недостаток данного подхода заключается

в том, что процесс консолидации грунтового основания всегда является затухающим и будет стабилизироваться, а процессы ползучести протекают с возрастающей или с уменьшающейся скоростью, которые соответствуют незатухающей и затухающей ползучести. Игнорирование влияния реологических свойств грунта для расчета осадки свайных фундаментов может приводить к недооценке осадки по предельным деформациям. Вопросы о взаимодействии свайных фундаментов с глинистым грунтом при учете фактора времени рассматривали М.А. Ясин, Ю.К. Зарецкий, М.А. Метс, Б.И. Далматова, А.А. Бартоломей, И.М. Омелячак, Б.С. Юшков, Ф.К. Лапшин,

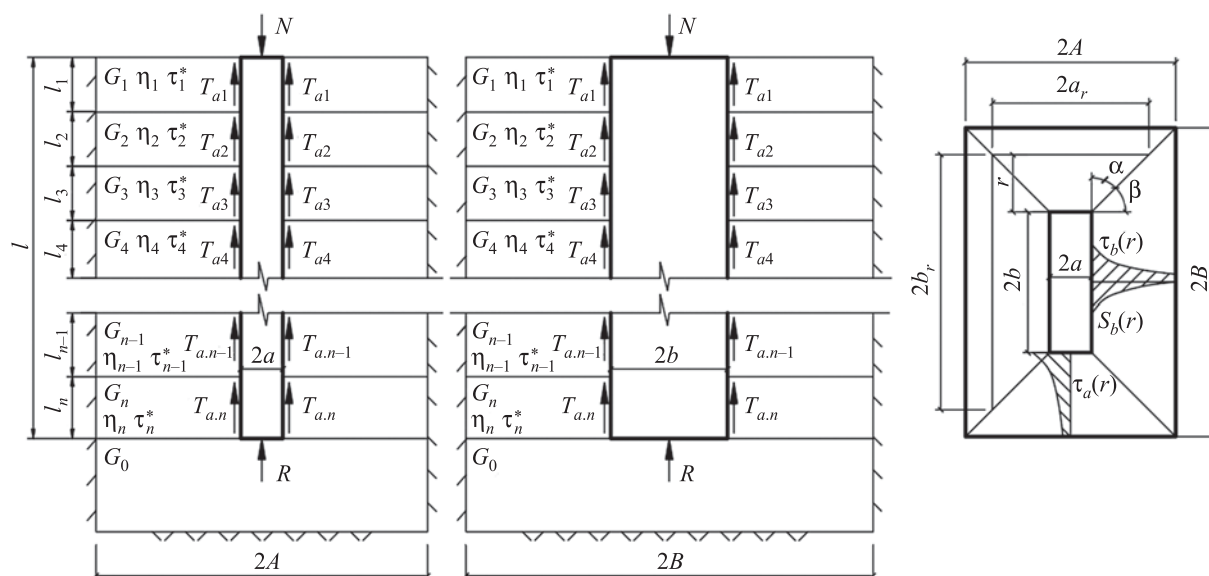


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия одиночной барретты с многослойным грунтовым массивом

Fig. 1. Calculation schema for the interaction between a single barrette and multilayered soil massif

З.Н. Нгуен, З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян и др. [2–15].

Методы расчета осадки одиночной барреты при взаимодействии с однородным грунтовым массивом были разработаны В.В. Сидоровым и З.Г. Тер-Мартirosяном [16, 17]. Однако для таких расчетов реологические свойства грунтового массива не учтены. Поэтому в настоящей работе изучен вопрос о взаимодействии одиночной барреты с многослойным грунтовым массивом, обладающим упруго-вязкопластическими свойствами.

Рассматривается геомеханическая модель в виде грунтовой ячейки конечных элементов $2A \times 2B$, вмещающей барреты абсолютной жесткости длиной l и размерами $2a \times 2b$, полагая, что влияние барреты ограничено размерами $2A \times 2B$, где вертикальные перемещения равны нулю. Расчетная схема представлена на рис. 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно работе [17] при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) массива грунта вокруг свай, барреты и под их пятой показано, что при их взаимодействии объемной деформацией окружающего грунта можно пренебречь, так как сдвиговые деформации на контактной поверхности барреты с грунтом преобладают. Также принимается гипотеза, что жесткость подстилающего грунта существенно превышает жесткость окружающего грунта $G_0 \gg G_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

Пусть одиночная баррета габаритом $2a \times 2b$ взаимодействует с неоднородной грунтовой ячейкой размером $2A \times 2B$, которая состоит из подстилающего грунта и многослойного окружающего грунта, мощность каждого слоя составляет l_i ($i = 1, 2, \dots, n$). К оголовку барреты приложена нагрузка N , которая воспринимается нижним концом R и боковой поверхностью T . В соответствии с геометрическими особенностями барреты, имеющей прямоугольное сечение $2a \times 2b$, силы трения на боковых поверхностях по сторонам $2a$ и $2b$ обозначаются T_a и T_b , т.е. суммарная сила трения принимается:

$$T = 2T_a + 2T_b. \quad (1)$$

В соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 1, силы трения T_a и T_b разделены на составляющие $T_{a1}, 2, \dots, n$ и $T_{b1}, 2, \dots, n$ индексами 1, 2, 3, ..., n обусловлены залегания слоев грунтов по порядку сверху вниз. При этом формулу можно записать следующим образом:

$$T = 2 \sum_{i=1}^n T_{a,i} + 2 \sum_{i=1}^n T_{b,i}. \quad (2)$$

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

$$N = R + T, \quad (3)$$

где

$$N = 4ab\sigma_N, \quad (4)$$

$$R = 4ab\sigma_R, \quad (5)$$

T принимается по формуле (2).

Сдвиговая деформация i -го слоя вокруг барреты определяется по следующей формуле [8, 9, 17]:

$$\gamma_i(r) = \frac{-dS_i(r)}{dr} = \frac{-\tau_i(r)}{G_i}, \quad (6)$$

где $S_i(r)$ — осадка i -го слоя грунта за счет касательного напряжения $\tau_i(r)$; G_i — модуль сдвига i -го слоя грунта ($i = 1, 2, \dots, n$);

$$\tau_i(r) = \frac{T_i}{2a(r)l_i}, \quad (7)$$

$$a(r) = a + r \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Согласно расчетной схеме (рис. 1), касательные напряжения на i -м слое по сторонам $2a$ и $2b$ соответственно представлены в формах:

$$\tau_{a,i}(r) = \frac{T_{a,i}}{2(a + r \cdot \operatorname{tg} \alpha)l_i}, \quad (8)$$

$$\tau_{b,i}(r) = \frac{T_{b,i}}{2(b + r \cdot \operatorname{tg} \beta)l_i}.$$

Интегрируя $S_i(r)$ из выражения (6) с учетом формулы (8), получаем зависимость осадок i -го слоя от r (рис. 1):

$$\begin{aligned} S_{a,i}(r) &= \frac{-T_{a,i}}{2G_i l_i} \int \frac{dr}{(a + r \cdot \operatorname{tg} \alpha)} = \\ &= \frac{-T_{a,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln(a + r \cdot \operatorname{tg} \alpha) + C_{a,i}, \\ S_{b,i}(r) &= \frac{-T_{b,i}}{2G_i l_i} \int \frac{dr}{(b + r \cdot \operatorname{tg} \beta)} = \\ &= \frac{-T_{b,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln(b + r \cdot \operatorname{tg} \beta) + C_{b,i}. \end{aligned} \quad (9)$$

Константы $C_{a,i}$ и $C_{b,i}$ могут быть определены из граничных условий, что на границе грунтовой ячейки при $r = B - b$; $S_{a,i}(B - b) = 0$; при $r = A - a$; $S_{b,i}(A - a) = 0$.

$$C_{a,i} = \frac{T_{a,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln[a + (B - b) \operatorname{tg} \alpha]; \quad (10)$$

$$C_{b,i} = \frac{T_{b,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln[b + (A - a) \operatorname{tg} \beta].$$

Осадки $S_{a,i}(r)$ и $S_{b,i}(r)$ достигают максимальных значений на боковой поверхности барреты ($r = 0$), при учете формулы (10) они представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{a,i} &= \frac{T_{a,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left[\frac{a + (B-b) \operatorname{tg} \alpha}{a} \right]; \\ S_{b,i} &= \frac{T_{b,i}}{2G_i l_i \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln \left[\frac{b + (A-a) \operatorname{tg} \beta}{b} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Осадку нижнего конца барреты получим по известной зависимости осадки прямоугольного жесткого штампа с учетом коэффициента глубины $K_l < 1$ [18], т.е. имеем:

$$S_R = \frac{\sigma_R(1 - \nu_0) a K_l \omega}{G_0} = \sigma_R K, \quad (12)$$

где σ_R — напряжение под нижним концом барреты; G_0 и ν_0 — параметры деформируемости

подстилающего слоя; ω — коэффициент, учитывающий формы штампа (квадрат, прямоугольник); $K = (1 - \nu_0) a K_l \omega / G_0$.

Из условия абсолютной жесткости барреты отметим, что осадки на поверхностях барреты $S_{a,i}$ и $S_{b,i}$ во всех слоях окружающего грунта и осадка S_R продавливания в подстилающий грунт нижнего конца барреты являются равными, т.е.:

$$\begin{aligned} S_R &= S_{a1} = S_{b1} = S_{a2} = S_{b2} = S_{a,i} = \\ &= S_{b,i} = \dots = S_{a,n} = S_{b,n}. \end{aligned} \quad (13)$$

На основе полученного условия равенства (13) запишем систему уравнений равновесия следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{T_{a1}}{2l_1 G_1} H_1 &= \frac{T_{b1}}{2l_1 G_1} H_2, \quad \frac{T_{a2}}{2l_2 G_2} H_1 = \frac{T_{b2}}{2l_2 G_2} H_2, \quad \frac{T_{a2}}{2l_2 G_2} H_1 = \frac{T_{b1}}{2l_1 G_1} H_2; \\ \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 &= \frac{T_{b,i}}{2l_i G_i} H_2, \quad \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 = \frac{T_{a,i+1}}{2l_{i+1} G_{i+1}} H_1; \\ \frac{T_{a,n}}{2l_n G_n} H_1 &= \frac{T_{b,n}}{2l_n G_n} H_2, \quad \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 = \sigma_R K, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \left[\frac{a + (B-b) \operatorname{tg} \alpha}{a} \right]; \\ H_2 &= \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \ln \left[\frac{b + (A-a) \operatorname{tg} \beta}{b} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (3) преобразовано так:

$$2 \sum_{i=1}^n T_{a,i} + 2 \sum_{i=1}^n T_{b,i} + 4 ab \sigma_R K = N. \quad (16)$$

Совмещая формулы (16) с (14), приобретаем систему уравнений для нахождения усилий, образующихся в грунтовом массиве при взаимодействии с барретами:

$$\begin{aligned} \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 &= \frac{T_{b,i}}{2l_i G_i} H_2; \quad \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 = \frac{T_{a,i+1}}{2l_{i+1} G_{i+1}} H_1; \\ \frac{T_{a,n}}{2l_n G_n} H_1 &= \frac{T_{b,n}}{2l_n G_n} H_2; \quad \frac{T_{a,i}}{2l_i G_i} H_1 = \sigma_R K; \\ 2 \sum_{i=1}^n T_{a,i} + 2 \sum_{i=1}^n T_{b,i} + 4 ab \sigma_R K &= N. \end{aligned} \quad (17)$$

Решение системы уравнений (17) имеет вид:

$$\begin{aligned} T_{a,i} &= N G_i l_i K \frac{H_2}{\lambda}; \quad T_{a,n} = N G_n l_n K \frac{H_2}{\lambda}; \\ T_{b,i} &= N G_i l_i K \frac{H_1}{\lambda}; \quad T_{b,n} = N G_n l_n K \frac{H_1}{\lambda}; \\ \sigma_R &= N \frac{H_1 H_2}{2\lambda}; \quad S_R = N K \frac{H_1 H_2}{2\lambda}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda &= 2 \left[K \left(\sum_{i=1}^n G_i l_i \right) (H_1 + H_2) + H_1 H_2 ab \right]; \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (19)$$

Очевидно, что при определенном соотношении этих параметров усилие на нижнем конце барреты R может меняться в широких пределах от нуля и до конечных значений. Устанавливая расчетную величину σ_R в линейной постановке, следует проверить степень ее приближения к предельному состоянию ($\sigma_R < \sigma_R^*$). Такую проверку можно осуществить по формуле Л. Прандтля [18, 19] в виде:

$$\sigma_R^* = (\gamma l + c_0 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0) \frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} e^{\pi \operatorname{tg} \varphi_0} - c_0 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad (20)$$

где γ — удельный вес грунта в пределах от поверхности грунта до глубины l ; l — глубина на уровне подошвы барреты; c_0 и φ_0 — параметры прочности подстилающего слоя грунта.

Рассмотрим пример: $N = 50\,000$ кН; $a = 0,75$ м; $b = 1,5$ м; $A = 3,75$ м; $B = 4,5$ м; $l_1 = 25$ м; $l_2 = 15$ м; $\alpha = \beta = 45^\circ$; $K_1 = 0,72$; $G_1 = 4400$ кПа; $G_2 = 6000$ кПа; $G_0 = 30\,000$ кПа; $\omega = 1,22$; $\nu_0 = 0,25$; $\gamma = 19$ кН/м³; $l = 40$ м; $\varphi_0 = 19^\circ$; $c_0 = 60$ кПа.

С помощью ПК Mathcad получим $T_{a1} = 4505$ кПа; $T_{a2} = 3686$ кПа; $T_{b1} = 6599$ кПа; $T_{b2} = 5400$ кПа; $\sigma_R = 2138$ кПа; $\sigma_R^* = 5010$ кПа; $S_R = 0,033$ м.

Сопоставление зависимостей осадок барреты от приложенной нагрузки N , полученных при использовании решения (18) и ПК Plaxis, представлено на рис. 2. Линейно-упругая модель применяется для

получения результатов численным методом. Деформационные параметры для моделей грунта в программе Plaxis внесены из вышеуказанного примера.

Зависимости осадки от нагрузки, полученные аналитическим и численным методами, представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, расхождение между двумя методами составляет около 3 %.

Для учета упруго-вязкопластического свойства окружающего грунта используется реологическая модель Максвелла в виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau^*}{\eta(t)} + \frac{\dot{\tau}}{G}, \quad (21)$$

где τ и τ^* — касательное и предельное напряжения в окружающем грунте и сопротивление сдвигу окружающего грунта соответственно, причем τ^* определяется из условия Кулона – Мора; $\eta(t)$ и G — вязкость и модуль сдвига окружающего грунта.

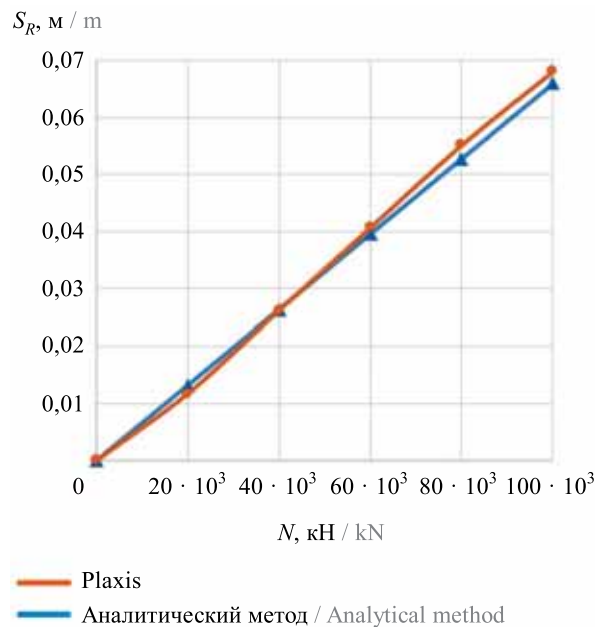


Рис. 2. Графики «нагрузка – осадка», полученные аналитическим методом по формуле (18) и численным методом Plaxis 3D

Fig. 2. Load – settlement graphs gained by analytical method using formula (18) and by Plaxis 3D

Пусть на боковых поверхностях барреты по сторонам $2a$ и $2b$ образуются общие приведенные касательные напряжения τ_a и τ_b соответственно при взаимодействии с многослойным окружающим грунтом. Причем сдвиговые деформации всех слоев окружающего грунта идентичны по сторонам $2a$ и $2b$, т.е.:

$$\gamma_{a,i} = \gamma_a, \gamma_{b,i} = \gamma_b, (i = 1, \dots, n), \quad (22)$$

где $\gamma_{a,i}$, $\gamma_{b,i}$ — сдвиговые деформации i -го слоя по сторонам $2a$ и $2b$ соответственно.

Отсюда получаем зависимость касательного напряжения $\tau_{a,i}$ i -го слоя от приведенного касатель-

ного напряжения τ_a , распределяющегося вдоль барреты:

$$\tau_{a,i} = \frac{\tau_a}{G} G_i, \quad (23)$$

где G — приведенный модуль сдвига массива окружающего грунта; G_i — модуль сдвига i -го слоя.

Суммарная сила трения T_a на боковой поверхности барреты по стороне $2a$ представлена следующим образом:

$$T_a = T_{a,1} + T_{a,2} + \dots + T_{a,n}; \quad (24)$$

$$2al\tau_a = 2al_1\tau_{a,1} + 2al_2\tau_{a,2} + \dots + 2al_n\tau_{a,n}. \quad (25)$$

Подставляя выражение (23) в (25), получаем:

$$\tau_a l = \tau_a \frac{l_1 G_1}{G} + \tau_a \frac{l_2 G_2}{G} + \dots + \tau_a \frac{l_n G_n}{G}. \quad (26)$$

После некоторых преобразований зависимость приведенного модуля сдвига массива грунта от модулей сдвига слоев окружающего грунта приобретает вид:

$$G = \frac{l_1 G_1 + l_2 G_2 + \dots + l_n G_n}{l}. \quad (27)$$

На основании условия (22) следует отметить, что скорости развития сдвиговой деформации всех слоев окружающего грунта и приведенного массива грунта идентичны, с учетом выражения (21) имеем:

$$\dot{\gamma}_{a,i} = \dot{\gamma}_a, \quad (28)$$

$$\frac{\tau_{a,i} - \tau_i^*}{\eta_i(t)} + \frac{\dot{\tau}_{a,i}}{G_i} = \frac{\tau_a - \tau^*}{\eta(t)} + \frac{\dot{\tau}_a}{G}, \quad (29)$$

где τ_i^* — сопротивление сдвигу i -го слоя окружающего грунта; $\eta_i(t)$ — вязкость i -го слоя окружающего грунта; $\eta(t)$ — усредненная вязкость массива грунта; τ^* — усредненное сопротивление сдвигу массива грунта, которое определяется аналогично выражениям (24) и (25):

$$T^* = T_1^* + T_2^* + \dots + T_n^*; \quad (30)$$

$$2al\tau^* = 2al_1\tau_1^* + 2al_2\tau_2^* + \dots + 2al_n\tau_n^*; \quad (31)$$

$$\tau^* = \frac{l_1\tau_1^* + l_2\tau_2^* + \dots + l_n\tau_n^*}{l}. \quad (32)$$

Дифференцируя формулу (23) по времени, получаем:

$$\frac{\dot{\tau}_{a,i}}{G_i} = \frac{\dot{\tau}_a}{G}. \quad (33)$$

С учетом (33) преобразованная форма выражения (29) представлена следующим образом:

$$T_{a,i} - T_i^* = (T_a - T^*) \frac{l_i \eta_i(t)}{l \eta(t)}, \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^n [T_{a,i} - T_i^*] = (T_a - T^*) \frac{\sum_{i=1}^n l_i \eta_i(t)}{l \eta(t)}. \quad (35)$$

Важно отметить, что $\sum_{i=1}^n [T_{a,i} - T_i^*] = T_a - T^*$, при этом находим зависимость усредненной вязкости массива грунта от вязкостей и мощностей слоев окружающего грунта:

$$\eta(t) = \frac{l_1 \eta_1(t) + l_2 \eta_2(t) + \dots + l_n \eta_n(t)}{l}. \quad (36)$$

Скорость развития осадки по поверхности барреты имеет зависимость вида:

$$\begin{aligned} \dot{S}(r) &= -\int \dot{\gamma}(r) dr + C, \\ \dot{S}_a(r) &= -\int \frac{\tau_a - \tau^*}{\eta(t)} dr + C_a, \\ \dot{S}_b(r) &= -\int \frac{\tau_b - \tau^*}{\eta(t)} dr + C_b. \end{aligned} \quad (37)$$

Выражения скорости развития осадок окружающего грунта на боковой поверхности барреты можно записать так:

$$\begin{aligned} \dot{S}_a &= \frac{T_a}{2\eta l \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left[\frac{a + (B-b) \operatorname{tg} \alpha}{a} \right] - \\ &- \frac{\tau^*}{\eta} (B-b) + \frac{T_a}{2Gl \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left[\frac{a + (B-b) \operatorname{tg} \alpha}{a} \right]; \\ \dot{S}_b &= \frac{T_b}{2\eta l \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln \left[\frac{b + (A-a) \operatorname{tg} \beta}{b} \right] - \\ &- \frac{\tau^*}{\eta} (A-a) + \frac{T_b}{2Gl \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln \left[\frac{b + (A-a) \operatorname{tg} \beta}{b} \right]. \end{aligned} \quad (38)$$

Скорость развития осадки подстилающего грунта зависит от скорости изменения напряжения σ_R под пятой барреты, т.е. имеем:

$$\dot{S}_R = \frac{\dot{\sigma}_R (1 - \nu_0) a K_l \omega}{G_0} = \dot{\sigma}_R K, \quad (39)$$

где

$$K = \frac{(1 - \nu_0) a K_l \omega}{G_0}. \quad (40)$$

Из условия равновесия осадок барреты (13) получаем условие равновесия скорости осадок, которое представлено в следующем виде:

$$\dot{S}_R = \dot{S}_a = \dot{S}_b. \quad (41)$$

Сопоставляя выражение (38) с (39) на основе условия равновесия (41) получаем систему уравнений равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{T_a}{2\eta l} H_1 - \frac{\tau^*}{\eta} (B-b) + \frac{\dot{T}_a}{2Gl} H_1 &= \\ = \frac{T_b}{2\eta l} H_2 - \frac{\tau^*}{\eta} (A-a) + \frac{\dot{T}_b}{2Gl} H_2; \\ \frac{T_a}{2\eta l} H_1 - \frac{\tau^*}{\eta} (B-b) + \frac{\dot{T}_a}{2Gl} H_1 &= \\ = \frac{\dot{\sigma}_R (1 - \nu_0) a K_l \omega}{G_0} = \dot{\sigma}_R K, \end{aligned} \quad (42)$$

где H_1, H_2 определяются по формуле (15).

Зависимость T_a и $\dot{T}_a$ от $T_b, \dot{T}_b$ и $\dot{\sigma}_R$ приобретена путем преобразования системы уравнений (42):

$$\begin{aligned} \frac{T_a}{\eta} + \frac{\dot{T}_a}{G} &= \left(\frac{T_b}{\eta} + \frac{\dot{T}_b}{G} \right) \frac{H_2}{H_1} + \\ &+ \frac{\tau^*}{\eta} \frac{2l}{H_1} [(B-b) - (A-a)], \end{aligned} \quad (43)$$

$$\frac{T_b}{\eta} + \frac{\dot{T}_b}{G} = \left[\dot{\sigma}_R K + \frac{\tau^*}{\eta} (A-a) \right] \frac{2l}{H_2}. \quad (44)$$

Из расчетной схемы условие равновесия будет выглядеть так:

$$T + R = N \quad (45)$$

или

$$2T_a + 2T_b + 4ab\sigma_R = N. \quad (46)$$

Дифференцируя формулу (46) по t , получаем следующую зависимость:

$$\dot{T}_a + \dot{T}_b + 2ab\dot{\sigma}_R = 0. \quad (47)$$

Учитывая выражения (46) и (47):

$$2 \left(\frac{T_a}{\eta} + \frac{\dot{T}_a}{G} \right) + 2 \left(\frac{T_b}{\eta} + \frac{\dot{T}_b}{G} \right) + 4ab \left(\frac{\sigma_R}{\eta} + \frac{\dot{\sigma}_R}{G} \right) = \frac{N}{\eta}. \quad (48)$$

Подставляя формулы (43) и (44) в (48) после некоторых преобразований, имеем:

$$\begin{aligned} 4\dot{\sigma}_R \left[\frac{(H_1 + H_2) l K \eta}{H_1 H_2} + \frac{\eta ab}{G} \right] + 4ab \sigma_R &= \\ = N - 4l \tau^* \left[\frac{(B-b) H_2 + (A-a) H_1}{H_1 H_2} \right], \end{aligned} \quad (49)$$

$$\dot{\sigma}_R + \sigma_R P = Q, \quad (50)$$

где

$$P = \frac{ab H_1 H_2}{(H_1 + H_2) l K \eta + \frac{\eta ab H_1 H_2}{G}}, \quad (51)$$

$$Q = \frac{N H_1 H_2 - 4l \tau^* [(B-b) H_2 + (A-a) H_1]}{4(H_1 + H_2) l K \eta + \frac{4\eta ab H_1 H_2}{G}}.$$

Решение дифференциального уравнения принимает следующую форму:

$$\sigma_R(t) = e^{-\int P dt} \left\{ \int Q e^{\int P dt} dt + C_0 \right\}, \quad (52)$$

$$\sigma_R(t) = \frac{Q}{P} + C_0 e^{-Pt}. \quad (53)$$

Постоянную интегрирования C_0 определяем из начального условия при $t = 0$. Тогда:

$$\sigma_R(t) = \frac{Q}{P} + \left[\sigma_R(0) - \frac{Q}{P} \right] e^{-Pt}, \quad (54)$$

где $\sigma_R(0)$ определяется в линейной постановке по формуле (18).

Зависимость осадки продавливания барреты $S_R(t)$ от времени представлена в виде:

$$S_R(t) = \sigma_R(t)K = \frac{Q}{P}K + \left[\sigma_R(0) - \frac{Q}{P} \right] K e^{-Pt}. \quad (55)$$

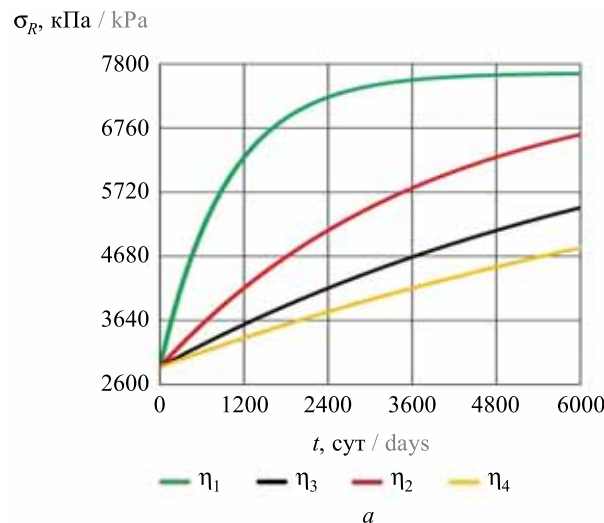
В случае переменной вязкости по времени принимаем закон изменения вязкости во времени $\eta_i(t) = \eta_{0,i}(1 + \alpha_i t)$ для i -го слоя окружающего грунта, уравнение (50) можно записать в виде:

$$\dot{\sigma}_R + \sigma_R \frac{P^*}{I_1 + tI_2} = \frac{Q^*}{I_1 + tI_2}, \quad (56)$$

где

$$P^* = \frac{abH_1H_2}{(H_1 + H_2)K\eta_0 + \frac{\eta_0 abH_1H_2}{G}}, \quad (57)$$

$$Q^* = \frac{NH_1H_2 - 4I\tau^*[(B-b)H_2 + (A-a)H_1]}{4(H_1 + H_2)K\eta_0 + \frac{4\eta_0 abH_1H_2}{G}}.$$



При учете граничного условия, что при $t = 0$, $\sigma_R(t=0) = \sigma_R(0)$, $\sigma_R(0)$ определяется по формуле (18), решение дифференциального уравнения (56) принимает форму:

$$\sigma_{R-\alpha}(t) = \frac{Q^*}{P^*} + \left[\sigma_R(0) - \frac{Q^*}{P^*} \right] (1 + \alpha t)^{\frac{-P^*}{\alpha}}. \quad (58)$$

Формула осадки барреты в определенный момент времени t установлена по формуле:

$$S_{R-\alpha}(t) = \sigma_R(t)K = \frac{Q^*}{P^*}K + \left(\sigma_R(0) - \frac{Q^*}{P^*} \right) K (1 + \alpha t)^{\frac{-P^*}{\alpha}}. \quad (59)$$

Рассмотрим решение уравнений (34) и (35) при следующих исходных данных: $N = 67\,500$ кН; $a = 0,75$ м; $b = 1,5$ м; $A = 3,75$ м; $B = 4,5$ м; $n = 2$; $l_1 = 20$ м; $l_2 = 10$ м; $\alpha = \beta = 45^\circ$; $K_l = 0,72$; $G_1 = 10\,500$ кПа; $G_2 = 15\,000$ кПа; $G_0 = 40\,000$ кПа; $\omega = 1,22$; $\nu_0 = 0,3$; $\tau^* = 60$ кПа; $\eta_{\text{слой1}} = \eta_{\text{слой2}} = \eta_1 = 10^{10}$ П; $\eta_2 = 4,10^{10}$ П; $\eta_3 = 8,10^{10}$ П; $\eta_4 = 12,10^{10}$ П. Результаты представлены на рис. 3.

Также рассмотрим решение уравнений (39) и (40) при вышеуказанных исходных данных с различными коэффициентами $\alpha_{1-1} = 10^{-4}$; $\alpha_{1-2} = 10^{-3}$; $\alpha_{1-3} = 5,10^{-3}$; $\alpha_{1-4} = 0,01$ для первого слоя окружающего грунта и $\alpha_{2-1} = 5,10^{-4}$; $\alpha_{2-2} = 5,10^{-3}$; $\alpha_{2-3} = 0,01$; $\alpha_{2-4} = 0,05$ для второго слоя окружающего грунта. Результаты представлены на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При анализе полученных зависимостей показано, что напряжение под пятой барреты и осадка барреты во времени возрастают с различной скоростью и достигают стабилизированных значений (при $t \rightarrow \infty$,

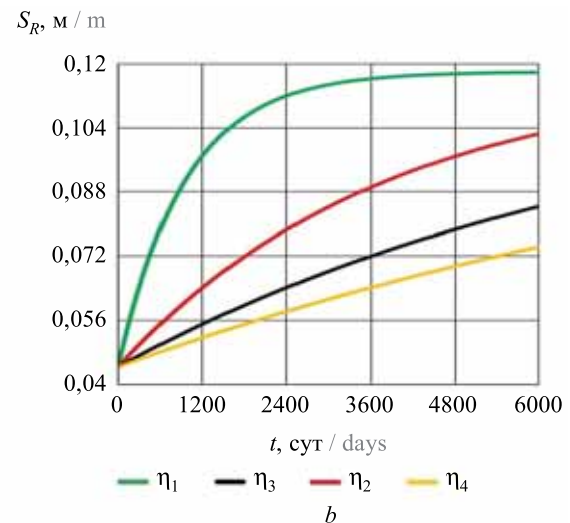


Рис. 3. Графики зависимости $\sigma_R(t)$ (a) и $S_R(t)$ (b) при различных параметрах вязкости окружающего грунта

Fig. 3. Dependency curves $\sigma_R(t)$ (a) and $S_R(t)$ (b) on time achieved for various values of viscosity of surrounding soils

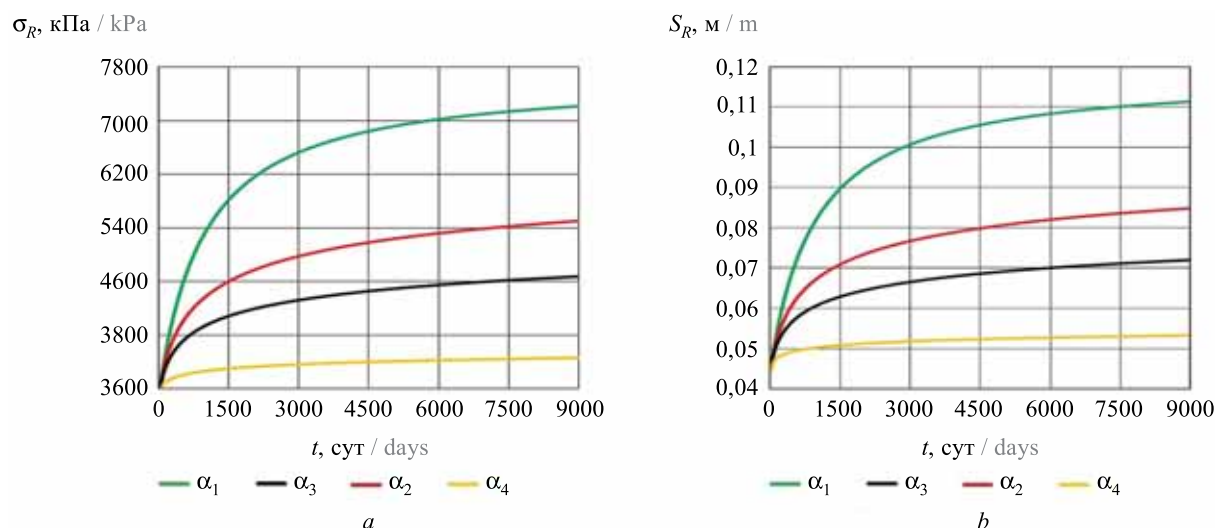


Рис. 4. Графики зависимости $\sigma_R(t)$ (a) и $S_R(t)$ (b) при различных коэффициентах α окружающего грунта
Fig. 4. Dependency curves $\sigma_R(t)$ (a) and $S_R(t)$ (b) at different coefficients α of the surrounding soil

$\sigma_R(t) \rightarrow \sigma_R(\infty) = \text{const}$, $S_R(t) \rightarrow S_R(\infty) = \text{const}$). Исходя из зависимости (3), при нарастании напряжения под пятой барреты силы трения на боковой поверхности барреты уменьшаются со временем. Приобретенные зависимости позволяют прогнозировать развитие осадки барреты во времени при учете упруго-вязкопластических свойств окружающего грунта. Приведенные результаты показали, что при увеличении коэффициента вязкости окружающего грунта развитие напряжения под пятой барреты и ее осадка замедляются. Согласно приобретенным зависимостям (рис. 4), при учете нарастания коэффициента вязкости во времени давление под подошвой барреты и осадка барреты уменьшаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлены постановка и решение задачи взаимодействия одиночной барреты с упругими

многослойным окружающим и подстилающим грунтами. Полученное решение является основой для задачи взаимодействия одиночной барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упруго-вязкопластических свойств.

При взаимодействии барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упруго-вязкопластических свойств образуются значительно сложные НДС, при этом изменяются во времени напряжение под нижним концом барреты и осадки барреты. Анализ приобретенных зависимостей демонстрирует, что при нарастании давления на пяте барреты во времени силы трения на боковой поверхности барреты уменьшаются. На перераспределение усилий на барреты между пятой и боковой поверхностью и время стабилизации осадок барреты существенно влияют реологические параметры многослойного окружающего грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М. : Стройиздат, 1994. 380 с.
2. Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. М. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1975. 240 с.
3. Ясин М.А. Методика испытаний и расчета свай на осадку и несущую способность в условиях ползучести : дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 151 с.
4. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 349 с.
5. Метс М.А. Изучение влияния инженерно-геологических факторов на несущую способность одиночных свай по результатам статических и динамических испытаний : дис. ... канд. техн. наук. М., 1976. 172 с.
6. Лапшин Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям. Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1979. 151 с.
7. Нгуен З.Н. Взаимодействие буронабивных длинных свай с грунтовым основанием с учетом фактора времени : дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 167 с.

8. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Занг Нам. Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 3–14.
9. Динь Х.Н. Взаимодействия длинных свай с грунтом в свайном фундаменте : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 151 с.
10. Россихин Ю.В. Свайные фундаменты на слабых и оседающих грунтах. Рига : РПИ, 1974. 157 с.
11. Струнин П.В. Напряженно деформированное состояние грунтоцементных свай, взаимодействующих с грунтовым основанием и межсвайным пространством : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 168 с.
12. Чинь Туан Вьет. Взаимодействие буронабивных длинных свай конечной жесткости с окружающим и подстилающим грунтами и ростверком : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 119 с.
13. Booker J., Poulos H. Analysis of creep settlement of pile foundations // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1976. Vol. 102. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000228
14. Hansbo Sven. Foundations on friction creep piles in soft clays // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 1984. Pp. 913–922.
15. Rosen R., Fredriksson A. Foundation on creep piles: Design parameters, graphical presentation by computer of resultant force systems as well as an analysis of test pile results // 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco).
16. Сидоров В.В. Напряженно-деформированное состояние неоднородного грунтового массива, взаимодействующего с барретами большой длины : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 159 с.
17. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов. М. : Изд-во АСВ, 2020. 946 с.
18. Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 119–132.
19. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1. М.-Л. : Госстройиздат, 1958. Т. 1. 356 с.

Поступила в редакцию 6 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 13 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 27 июня 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 6603474514, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgisu.ru;

Армен Завенович Тер-Мартirosян — доктор технических наук, профессор, проректор, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9467-5034, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; Ter-MartirosianAZ@gic.mgisu.ru;

Хынг Хыу Дам — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ORCID: 0000-0001-7463-0521; Scopus: 57385738200; hungdh1992@gmail.com.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян З.Г. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Тер-Мартirosян А.З. — научное редактирование текста.

Хынг Хыу Дам — проведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. *Prediction of settlement of pile foundations*. Moscow, Stroyizdat, 1994; 380. (rus.).
2. Dalmatov B.I., Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. *Design of pile foundations in conditions of weak soils*. Moscow, Stroyizdat. Leningrad, 1975; 240. (rus.).
3. Yasin M.A. *Methodology for testing and calculating piles for settlement and bearing capacity under creep conditions: thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 1990; 151. (rus.).
4. Zaretsky Yu.K. *Viscoplasticity of soils and calculations of structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 349. (rus.).
5. Mets M.A. *Study of the influence of engineering-geological factors on the bearing capacity of single piles based on the results of static and dynamic tests* :

thesis of candidate of technical sciences. Moscow, 1976; 172. (rus.).

6. Lapshin F.K. *Calculation of piles for limit states*. Saratov, Publishing House of the Saratov University, 1979; 151. (rus.).

7. Nguyen Z.N. *Interaction of bored long piles with soil base considering time factor : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2007; 167. (rus.).

8. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Giang Nam. Interaction between long piles and a heterogeneous massif with account for non-linear and rheological properties of soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2008; 2:3-14. (rus.).

9. Dinh H.N. *Interactions of long piles with soil in a pile foundation : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2006; 151. (rus.).

10. Rossikhin Yu.V. *Pile foundations on weak and subsiding soils*. Riga, FIR Publ., 1974; 157. (rus.).

11. Strunin P.V. *Stress-strain state of soil-cement piles interacting with the soil base and the inter-pile space : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2013; 168. (rus.).

12. Trinh Tuan Viet. *Interaction of bored long piles of finite stiffness with surrounding and underlying soils and the pile cap : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2015; 119. (rus.).

13. Booker J., Poulos H. Analysis of creep settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical*

Engineering Division. 1976; 102(1):1-14. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000228

14. Hansbo Sven. Foundations on friction creep piles in soft clays. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 1984; 913-922.

15. Rosen R., Fredriksson A. Foundation on creep piles: Design parameters, graphical presentation by computer of resultant force systems as well as an analysis of test pile results. *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco)*.

16. Sidorov V.V. *Stress-strain state of an inhomogeneous soil mass interacting with long barrettes : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2013; 159. (rus.).

17. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil Mechanics*. Moscow, ASV Publishing House, 2020; 946. (rus.).

18. Doroshkevich N.M., Znamensky V.V., Kudinov V.I. Engineering methods for calculating pile foundations for various loading schemes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2006; 1:119-132. (rus.).

19. Florin V.A. *Fundamentals of soil mechanics*. Vol. 1. Leningrad; Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1958; 356. (rus.).

Received June 6, 2022.

Adopted in revised form on June 13, 2022.

Approved for publication on June 2, 2022.

BIONOTES: **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 6603474514, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5304, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; Ter-MartirosianAZ@gic.mgsu.ru;

Hung Huu Dam — postgraduate of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7463-0521; Scopus: 57385738200; hungdh1992@gmail.com.

Contribution of the authors:

Zaven G. Ter-Martirosyan — scientific guidance, concept of research, development of methodology, scientific text editing.

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific text editing.

Hung Huu Dam — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1145-1159

Нейросетевое прогнозирование сопротивления поперечной силе армированных бетонных двутавровых балок

Мурат Мухамедович Тамов, Ольга Валентиновна Руденко,
Сергей Владимирович Усанов

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В тонких стенках железобетонных балок в зоне совместного действия поперечных сил и изгибающего момента образуется система наклонных трещин. Прочность заключенных между трещинами бетонных полос зависит от размеров стенки, прочности бетона, параметров поперечного и продольного армирования и пролета среза загрузки. Деформационные модели для плоского напряженного состояния железобетона сложны в применении, ввиду чего в нормах для расчета прочности стенки приняты эмпирические формулы, полученные по имеющимся экспериментальным данным. Изучалась возможность более точного учета влияния конструктивных параметров и схемы загрузки инструментами машинного обучения — искусственными нейронными сетями (ИНС). Анализируемая экспериментальная база включала результаты испытаний 77 балок. Входной слой ИНС состоял из семи независимых переменных, выходной — из одной зависимой, в качестве функций активации рассматривались как линейные, так и нелинейные функции.

Материалы и методы. Объектом исследования служили испытанные авторами бетонные балки двутаврового сечения с базальтокомпозитным и стальным поперечным армированием. Для обеспечения статистической значимости независимых переменных по всем показателям добавлены данные из опытов других авторов. Нейронные сети создавались в программе STATISTICA. На первом этапе применялись нормализованные значения параметров. Затем точность прогнозирования ИНС сравнивалась с точностью регрессионных моделей. На заключительном этапе расчеты производились без нормализации параметров.

Результаты. Установлено, что результаты прогнозирования с помощью ИНС имеют высокую точность: относительная погрешность прогнозирования по нормализованным параметрам составила 28,6 % для регрессионного метода и 10,9 % для ИНС. Для расчетов при помощи ИНС по данным без предварительной нормализации относительная погрешность прогнозирования составила 6,6 %.

Выводы. Результаты настоящего исследования и других аналогичных работ отечественных и зарубежных авторов позволяют считать ИНС перспективным инструментом решения трудно формализуемых задач расчета строительных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двутавровые балки, композитное армирование, поперечная сила, прочность стенки, искусственные нейронные сети, наклонные трещины, нейросетевое прогнозирование

Благодарности. Инновационный проект выполнен при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках конкурса научно-инновационных проектов, ориентированных на коммерциализацию № НИП-20.01/27.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамов М.М., Руденко О.В., Усанов С.В. Нейросетевое прогнозирование сопротивления поперечной силе армированных бетонных двутавровых балок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1145–1159. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1145-1159

Автор, ответственный за переписку: Сергей Владимирович Усанов, svusanov@gmail.com.

Neural network prediction of web-crushing strength of i-shaped reinforced concrete beams

Murat M. Tamov, Olga V. Rudenko, Sergey V. Usanov

Kuban State Technological University (KubSTU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Under the combined action of shear force and bending moment web-shear cracking takes place in the thin webs of reinforced concrete beams. The strength of the concrete struts between the cracks depends on the size of the web, concrete strength, parameters of the transverse and longitudinal reinforcement, and the shear span-to-depth ratio. Plane stress constitutive models for reinforced concrete are difficult to implement. For this reason, building codes employ empirical formulas for web-crushing strength which were obtained from the analysis of the existing experimental data. Using machine learning tools — artificial neural networks (ANN) — can serve as a solution that allows to take into account the impact of structural and loading parameters more accurately. The analyzed experimental base included the test results of 77 beams.

The input layer of the ANN consisted of 7 independent variables, the output — of 1 dependent, and both linear and nonlinear functions were considered as activation functions.

Materials and methods. The article studies I-shaped concrete beams with basalt fiber reinforced polymer and steel transverse reinforcement tested by authors. To ensure the statistical significance of independent variables in all indicators, the database of other authors was also considered. Neural networks were developed using STATISTICA software package. In the first stage, the input and output variables were normalized. The accuracy of the ANN model prediction was compared with the accuracy of regression models. In the last stage, the calculations were performed without normalizing the variables.

Results. Artificial neural networks prediction has high accuracy. The relative error of prediction was 28.6 % for the regression method and 10.9 % for the ANN. For calculations without preliminary normalization relative error of prediction was 6.6 %.

Conclusions. The results of research and other similar studies suggest ANN to be a promising tool for solving intractable problems of structural engineering.

KEYWORDS: I-shaped beams, FRP-reinforcement, shear force, web-crushing strength, artificial neural networks, shear cracks, neural network prediction

Acknowledgment. The innovation project was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the commercializable scientific and innovation projects competition No. NIP-20.01/27.

FOR CITATION: Tamov M.M., Rudenko O.V., Usanov S.V. Neural network prediction of web-crushing strength of i-shaped reinforced concrete beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1145-1159. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1145-1159 (rus.).

Corresponding author: Sergey V. Usanov, svusanov@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Арматура композитная полимерная (АКП) находит все большее применение в строительной отрасли¹ [1–5]. Особенности АКП, определяющие область ее рационального использования, включают высокую кратковременную прочность на растяжение, низкий модуль упругости, коррозионную стойкость, радиопрозрачность, низкую теплопроводность и малый удельный вес, высокую огнестойкость [6, 7]. Разработка обоснованных методик расчета бетонных конструкций, армированных АКП, требует проведения соответствующих численных и экспериментальных исследований.

Малоизученным вопросом остается работа наклонных сечений бетонных изгибаемых элементов с поперечным армированием из АКП. Одной из форм разрушений таких конструкций, возможной при высоком содержании поперечной арматуры, является раздробление стенки приопорной зоны. Экспериментальными исследованиями установлено, что на сопротивление стенки, помимо очевидных параметров — прочность бетона, размеры сечения, оказывают влияние также и схема нагружения (пролет среза), интенсивность поперечного армирования и угол наклона хомутов, деформационные характеристики арматуры [8]. Значительное количество требующих учета параметров делает затруднительной разработку физических моделей для инженерных методик расчета. Поэтому в отечественных и зарубежных нормах проектирования для расчета прочности стенки приняты эмпирические формулы, основанные на результатах экспериментов [9]. Некоторые из вышеперечисленных параметров в формулах норм не учитываются. Возможная взаи-

мозависимость влияния параметров формулами не рассматривается. Решением, позволяющим устранить эти недостатки, может послужить применение инструментов машинного обучения, способных определять искомые величины на основании обобщения имеющихся примеров без явного программирования [10–12].

В последние десятилетия приобрели широкую популярность и превратились в эффективный инструмент для решения многих инженерных задач математические модели, схожие с функционированием нервных клеток живого организма [13–16] и получившие название «искусственные нейронные сети» (ИНС). Имеющийся опыт применения ИНС для развития методик расчета железобетонных конструкций на поперечную силу распространяется только на разрушение балок по наклонным сечениям [17–19]. Цель настоящей работы — проверка возможности прогнозирования при помощи ИНС прочности тонкой стенки балок на приопорных участках (прочность по наклонной полосе между трещинами). Объект исследования — балки двутаврового сечения с базальтокомпозитным и стальным (эталонные образцы) поперечным армированием, изготовленные и испытанные авторами в лаборатории кафедры строительных конструкций КубГТУ [9], а также тавровые и двутавровые железобетонные балки других исследователей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках экспериментального исследования характера работы тонкой стенки бетонных балок с композитным поперечным армированием было испытано 28 балок с базальтопластиковой и стальной (эталонные образцы) арматурой. Пролет балок составлял 2340 мм, рабочая высота и толщина стенки были соответственно равны 260 и 30 мм. Испытания проводились при трех относительных пролетах сре-

¹ ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. American Concrete Institute, 2015. 88 p.

за a/h_0 — 1,6; 2,5 и 3,2. Процент поперечного армирования варьировался в пределах 0,4–1,3 %, угол наклона армирования стенки к продольной оси образцов составлял 90 и 45 градусов. Подробные характеристики балок приведены в табл. 1. Испытания образцов проводились в замкнутой силовой раме четырехточечным изгибом.

Для обеспечения статистической значимости независимых переменных по всем показателям к нашим образцам были добавлены данные из опытов других авторов [8, 20–23]. В табл. 1 приведены характеристики образцов рассматриваемой выборки: относительный пролет среза a/h_0 , угол наклона поперечной арматуры α , толщина стенки b , рабочая

высота балок h_0 , призматическая прочность бетона R_b , процент поперечного армирования μ_{sw} , модуль упругости поперечной арматуры E и величина разрушающей поперечной силы Q_{ult} , являющаяся параметром, рассчитываемым средствами ИНС. Общее количество образцов в выборке равно 77.

Один из наиболее популярных программных продуктов, используемых для создания нейронных сетей (НС), — STATISTICA Neural Networks (SNN), разработанный компанией StatSoft. Пакет SNN встроен в набор других аналитических средств программы STATISTICA, что позволяет применять при оценке данных как регрессионные, так и нейросетевые методы.

Табл. 1. Характеристики балок

Table 1. Parameters and shear capacity of the beams

Номер п/п N/a number	Автор Author	Шифр балки Beam cipher	a/h_0	α , град hail	b , мм mm	h_0 , мм mm	R_b , МПа MPa	μ_{sw} , %	E , МПа MPa	Q_{ult} , кН kN
1	М.М. Тамоу [8] M.M. Tamov [8]	Б1	1,60	90,00	30	260	31,90	0,59	170	88,70
2		Б2	1,60	90,00	30	260	26,90	0,59	170	68,10
3		Б3	1,60	90,00	30	260	33,00	0,59	170	91,60
4		Б4	1,60	90,00	30	260	25,80	0,59	170	75,00
5		Б5	1,60	90,00	30	260	26,10	0,59	170	65,70
6		Б6	1,60	90,00	30	260	29,80	0,59	170	81,80
7		Б7	1,60	90,00	30	260	31,60	0,59	170	96,50
8		Б8	2,50	90,00	30	260	34,70	0,59	170	66,00
9		Б9	2,50	90,00	30	260	30,80	0,59	170	68,90
10		Б10	2,50	90,00	30	260	31,90	0,59	170	71,90
11		Б11	2,50	90,00	30	260	29,40	0,59	170	84,80
12		Б12	2,50	90,00	30	260	27,10	0,59	170	68,00
13		Б13	2,50	45,00	30	260	29,10	0,83	170	86,60
14		Б14	2,50	45,00	30	260	29,00	0,83	170	64,00
15		Б15	2,50	45,00	30	260	29,10	0,83	170	80,70
16		Б16	2,50	45,00	30	260	31,90	0,83	170	85,60
17		Б17	2,50	45,00	30	260	31,40	0,83	170	73,80
18		Б18	2,50	45,00	30	260	30,50	0,83	170	93,40
19		Б19	3,20	90,00	30	260	28,00	0,59	170	52,10
20		Б20	3,20	90,00	30	260	28,20	0,59	170	56,20
21		Б21	3,20	90,00	30	260	27,70	0,59	170	53,40
22		Б22	3,20	90,00	30	260	28,90	0,59	170	81,40
23		Б23	3,20	90,00	30	260	24,80	0,59	170	48,90
24		Б24	3,20	90,00	30	260	31,90	0,59	170	61,90
25		Б25	3,20	90,00	30	260	30,80	0,59	170	59,60
26		Б26	3,20	90,00	30	260	31,20	0,59	170	59,60
27		Б27	3,20	90,00	30	260	26,90	1,64	170	62,90
28		Б28	3,20	90,00	30	260	30,80	1,64	170	78,10
29		Б29	3,20	90,00	30	260	32,40	1,64	170	82,70
30		Б30	3,20	90,00	30	260	33,00	1,64	170	84,10

Номер п/п N/a number	Автор Author	Шифр балки Beam cipher	a/h_0	α , град hail	b , мм mm	h_0 , мм mm	R_b , МПа MPa	μ_{sw} , %	E , МПа MPa	Q_{ul} , кН kN
31	F. Leonhardt [20]	NR8	2,00	90	60	350	14,25	2,78	200	120
32		NR10	2,00	90	60	350	22,71	3,29	200	225
33		NT8-1	2,00	90	60	350	19,03	2,78	200	210
34		NT8-2	2,00	90	60	350	19,42	2,78	200	210
35		NT10	2,00	90	60	350	16,21	3,29	200	165
36		T1	3,00	90	100	830	23,3	1,41	200	80
37		T2	3,00	45	100	830	21,06	1,43	200	116
38	С.В. Усанов [9] S.V. Usanov [9]	Б1-В-0.4	1,6	90	30	260	27,0	0,4	56	54,9
39		Б1-В-0.7	1,6	90	30	260	27,3	0,7	56	57,6
40		Б1-В-1.0	1,6	90	30	260	28,5	1,0	56	77,4
41		Б1-В-1.3	1,6	90	30	260	27,5	1,3	56	71,5
42		Б1-Н-0.4	1,6	45	30	260	24,5	0,4	56	61,7
43		Б1-Н-0.7	1,6	45	30	260	25,4	0,7	56	62,1
44		Б1-Н-1.0	1,6	45	30	260	28,7	1,0	56	76,2
45		Б1-Н-1.3	1,6	45	30	260	25,2	1,3	56	70,5
46		Б2-В-0.4	2,5	90	30	260	27,2	0,4	56	42,7
47		Б2-В-0.7	2,5	90	30	260	27,2	0,7	56	47,1
48		Б2-В-1.0	2,5	90	30	260	29,4	1,0	56	51,2
49		Б2-В-1.3	2,5	90	30	260	29,4	1,3	56	57,1
50		Б2-Н-0.4	2,5	45	30	260	25,2	0,4	56	48,1
51		Б2-Н-0.7	2,5	45	30	260	25,2	0,7	56	50,3
52		Б2-Н-1.0	2,5	45	30	260	24,1	1,0	56	44,8
53		Б2-Н-1.3	2,5	45	30	260	24,1	1,3	56	55,4
54		Б3-В-0.4	3,2	90	30	260	29,8	0,4	56	42,5
55		Б3-В-0.7	3,2	90	30	260	30,7	0,7	56	48,7
56		Б3-В-1.0	3,2	90	30	260	28,6	1,0	56	47,2
57		Б3-В-1.3	3,2	90	30	260	27,2	1,3	56	47,4
58		Б3-Н-0.4	3,2	45	30	260	27,7	0,4	56	42,8
59		Б3-Н-0.7	3,2	45	30	260	26,3	0,7	56	50,1
60		Б3-Н-1.0	3,2	45	30	260	25,7	1,0	56	46,3
61		Б3-Н-1.3	3,2	45	30	260	28,7	1,3	56	56,2
62		БЭ1-1.0	2,5	90	30	260	28,9	1,0	170	65,1
63		БЭ1-1.3	2,5	90	30	260	28,9	1,3	170	74,5
64		БЭ2-1.0	3,2	90	30	260	29,7	1,0	170	62,5
65		БЭ2-1.3	3,2	90	30	260	29,7	1,3	170	70,8
66	B.V. Rangan [21]	I-1	2,5	90	74	563	34,3	2,72	200	453,1
67		I-2	2,5	90	74	563	28,4	1,53	200	371
68		I-3	2,5	90	63	563	29,3	3,19	200	369,1
69		I-4	2,5	90	64	563	33,5	1,77	200	416
70	E.A. Ahmed [22]	SC-9.5-2	3,33	90	180	600	39,67	0,26	130	376
71		SC-9.5-3	3,33	90	180	600	32,90	0,39	130	440

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер п/п N/a number	Автор Author	Шифр балки Beam cipher	a/h_0	α , град hail	b , мм mm	h_0 , мм mm	R_b , МПа MPa	μ_{sw} , %	E , МПа MPa	Q_{ult} , кН kN
72	E. Shehata [23]	SC2	3,19	90	135	470	50,76	0,24	137	277,5
73		SC3	3,19	90	135	470	50,76	0,36	137	341
74		SC4	3,19	90	135	470	47,94	0,49	137	375,5
75		SG2	3,19	90	135	470	50,76	0,71	41	292
76		SG3	3,19	90	135	470	31,02	1,06	41	312,5
77		SG4	3,19	90	135	470	31,02	1,42	41	311,5

На первом этапе создавалась ИНС, входной слой которой включал 7 независимых переменных: a/h_0 (x_1), α (x_2), b (x_3), h_0 (x_4), R_b (x_5), μ_{sw} (x_6) и E (x_7). Выходной слой состоял из одной зависимой переменной Q_{ult} (y). Проценты обучающей, тестовой и контрольной партий были сохранены стандартными: для обучающей партии — 70 %, тестовой — 15 % и контрольной — 15 % [15, 24]. Архитектурой НС выбран многослойный перцептрон с одним промежуточным слоем, содержащим от 1 до 20 нейронов. При построении сети был испробован набор функций активации нейронов (линейная, логарифмическо-сигмоидная и т.д.). Количество циклов обучения (эпох) принималось равным 1000 (рис. 1).

Ввиду того, что параметры балок и разрушающая нагрузка имеют различные единицы измерения, выполнена нормализация всех значений параметров x_i для входного и выходного слоев с использованием их статистических характеристик — среднего значения $\bar{x}_i$ и дисперсии σ_i по формуле:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}. \quad (1)$$

Нормализация является часто используемым приемом при создании ИНС и осуществляется различными способами в зависимости от особенностей решаемых задач [25, 26]. Она позволяет существенно улучшить качество получаемой модели для сопоставления результатов прогнозирования, полученных различными методами.

Алгоритмом обучения всех ИНС являлся BFGS (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno algorithm — алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно) — квазиньютоновский метод численной оптимизации, предназначенный для нахождения локального максимума/минимума функций. Функция ошибок SOS (sum of squares) минимизирует средне-квадратическую ошибку полученной НС и вычисляется по формуле:

$$E(w_{ij}) = \sum_{i=1}^m (y_i - y'_i)^2, \quad (2)$$

где y_i — выходное значение i -го нейрона выходного слоя; y'_i — требуемое значение i -го нейрона выходного слоя.

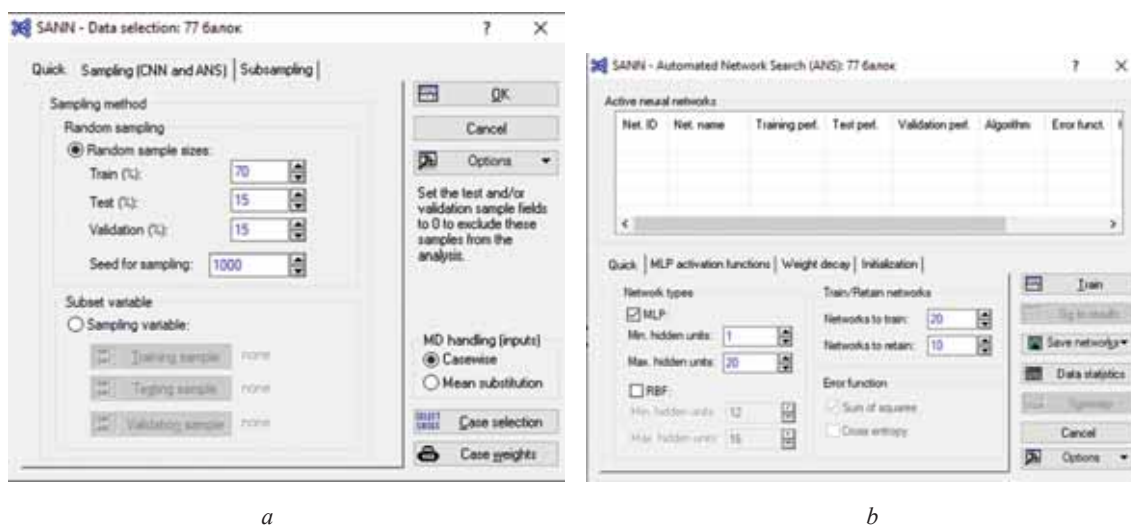


Рис. 1. Параметры создаваемой ИНС: а — для случайной выборки; б — для многослойного перцептрона и обучения ИНС
Fig. 1. Details of the ANN: a — for random sampling; b — for multilayer perceptron and ANN training

Уравнения регрессий, использованные на втором этапе для сравнения полученных результатов прогнозирования со значениями по данным нейросетевого метода, имели следующий вид:

- для квадратичной регрессии:

$$y = a_0 + a_1x_3 + a_2x_4 + a_3x_5 + b_1x_3^2 + b_2x_4^2 + b_3x_5^2 + b_4x_3x_4 + b_5x_3x_5 + b_6x_4x_5; \quad (3)$$

- для кубической регрессии:

$$y = a_0 + a_1x_3 + a_2x_4 + a_3x_5 + b_1x_3^2 + b_2x_4^2 + b_3x_5^2 + b_4x_3x_4 + b_5x_3x_5 + b_6x_4x_5 + c_1x_3^3 + c_2x_4^3 + c_3x_5^3, \quad (4)$$

где a, b, c — коэффициенты независимых переменных регрессий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 приведена выборка полученных ИНС. Пакет SNN предлагает пользователю самостоятельно выбрать архитектуру ИНС. Наилучшая архитектура отбиралась по показателям наименьшей ошибки обучения контрольной партии при одновременном учете соответствующих ошибок обучения тестовой и обучающей выборок.

Отобранная из приведенных выше ИНС (выделена зеленой рамкой на рис. 2) включает 17 нейронов в промежуточном слое. Функцией активации для скрытого слоя является логарифмическо-сигмоидная функция, для выходного слоя — гиперболический тангенс (рис. 3).

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation p...	Algorithm	Error funct.	Hidden act.	Output act.
MLP 7-3-1	0.990453	0.989884	0.974114	BFGS 38	SOS	Tanh	Identity
MLP 7-6-1	0.829153	0.992097	0.900591	BFGS 6	SOS	Logistic	Sine
MLP 7-8-1	0.999257	0.987372	0.966768	BFGS 108	SOS	Tanh	Sine
MLP 7-7-1	0.840579	0.992348	0.920105	BFGS 6	SOS	Sine	Logistic
MLP 7-17-1	0.996245	0.993244	0.980151	BFGS 63	SOS	Logistic	Tanh
MLP 7-6-1	0.996228	0.988060	0.982985	BFGS 43	SOS	Tanh	Tanh
MLP 7-17-1	0.995977	0.994089	0.985518	BFGS 49	SOS	Logistic	Tanh
MLP 7-11-1	0.885107	0.994522	0.953803	BFGS 36	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-18-1	0.995971	0.984795	0.980134	BFGS 55	SOS	Tanh	Tanh

Рис. 2. Характеристики полученных ИНС

Fig. 2. Characteristics of the obtained ANN

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 7-17-1	0.995977	0.994089	0.985518	0.004132	0.005190	0.024287	BFGS 49	SOS	Logistic	Tanh

Рис. 3. Характеристики выбранной ИНС

Fig. 3. Parameters of the selected ANN

Прогнозирование результатов с помощью ИНС и сопоставление их с исходными данными позволяет рассчитать относительную погрешность использования ИНС по формуле:

$$\delta = \frac{y_{\text{инс}} - y_i}{y_i} 100 \%, \quad (5)$$

где $y_{\text{инс}}$ — нормализованное значение разрушающей нагрузки, полученное при прогнозировании с помощью ИНС в i -м испытании; y_i — нормализованное фактическое значение разрушающей нагрузки в i -м испытании.

В среднем относительная погрешность составила 10,86 % (при этом в расчете не учитывался один результат с погрешностью 1759 %, являвшийся выбросом).

Анализ общей чувствительности к входным переменным ИНС (рис. 4) показал, что параметрами,

оказывающими наибольшее влияние на данные выходного слоя, являются рабочая высота балки h_0 (x_4) и прочность бетона R_b (x_5). Эти величины будут служить в дальнейшем фактор-аргументами для регрессионных моделей, а величина $Q_{ult}(y)$ — целевой функцией.

Sensitivity analysis (77 банок)						
Samples: Train						
h_0	R_b	b	E	α	a/h_0	$\mu_{\text{ср}}$
239.2786	27.78572	24.09296	9.019829	2.844891	2.326396	1.606710

Рис. 4. Анализ общей чувствительности ИНС

Fig. 4. ANN global sensitivity analysis

На втором этапе работы проводились разведочный анализ данных на предмет наличия выбросов и незначимых данных путем построения тернарного графика с помощью сплайн-интерполяции и прогно-

зирование результатов эксперимента с применением регрессий. Корреляционный анализ, выполненный для полученных параметров, дал возможность оценить значимость коэффициентов корреляции и наличие мультиколлинеарности (существенной связи между самими независимыми переменными). Матрица с парными коэффициентами корреляции r для всех сочетаний переменных приведена на рис. 5. Значимые коэффициенты корреляции программа STATISTICA выделяет красным цветом. Для обеих независимых переменных парные коэффициенты корреляции являются значимыми (по шкале Чеддока переменная x_4 имеет высокую связь с независимой переменной, x_5 — умеренную). Мультиколлинеарность практически отсутствует, так как парный коэффициент корреляции равен 0,197461, что не превышает допустимое значение 0,7 (по шкале Чеддока, если $|r| < 0,3$ — связь практически отсутствует [27]).

Correlations (77 балок)					
Marked correlations are significant at $p < .05000$					
N=77 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Means	Std.Dev.	Q_{ult}	h_0	R_b
Q_{ult}	0,000000	1,000000	1,000000	0,723520	0,447918
h_0	0,000000	1,000000	0,723520	1,000000	0,197461
R_b	-0,000000	1,000000	0,447918	0,197461	1,000000

Рис. 5. Корреляционная матрица

Fig. 5. Correlation matrix

Тернарный график на рис. 6 позволяет провести визуальный анализ поверхности $Q_{ult}(h_0, R_b)$ и выбрать спецификацию регрессионной модели. На практике предпочтение отдается более простым видам функций, так как они в большей степени поддаются интерпретации и требуют меньшего объема наблюдений. Интерполяция сплайнами дала возможность предположить, что для прогнозирования результатов лучше использовать квадратичную или кубическую регрессии. Для создания регрессии каждого вида использовались уравнения с тремя параметрами, име-

ющими наибольшее влияние (рис. 4): толщина стенки b (x_3), рабочая высота балки h_0 (x_4) и призмная прочность бетона R_b (x_5).

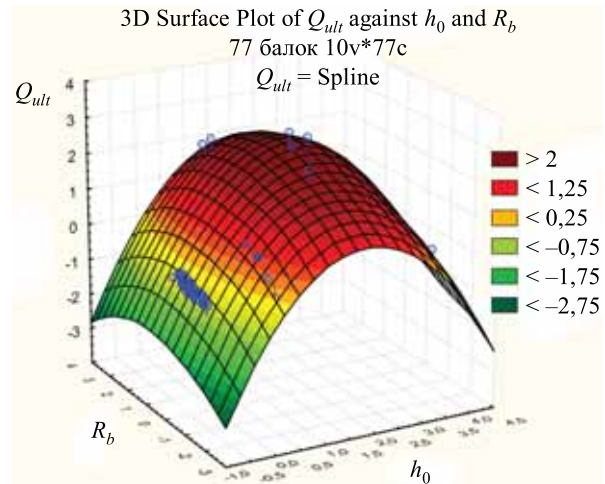


Рис. 6. Тернарный график, полученный с помощью 3D Surface plot

Fig. 6. Ternary graph obtained from 3D Surface plot

Регрессии анализировались пошагово (рис. 7). В модель включались (или исключались из нее) переменные, которые вносят наибольший (наименьший) вклад на данном шаге. Данная опция позволяет остановиться на шаге, при котором коэффициент детерминации еще не наибольший, однако уже все переменные модели являются значимыми.

Аппроксимация функций выполнялась методом наименьших квадратов. В каждом случае оценивался множественный коэффициент корреляции, слагаемые регрессий последовательно исключались из уравнений до достижения p -уровня вероятности отклонения гипотезы о значимости частного коэффициента корреляции для каждой величины 0,05 (в нашем случае p -уровень был существенно ниже этого уровня (рис. 8)).

	Estimate	Standard error	t-value df = 67	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	0.598991	0.066564	8.99870	0.000000	0.46613	0.731854
a1	-0.015852	0.225902	-0.07017	0.944267	-0.46675	0.435050
a2	2.064603	0.193797	10.65343	0.000000	1.67778	2.451423
a3	0.200911	0.040677	4.93914	0.000006	0.11972	0.282103
b1	-0.460446	0.202711	-2.27145	0.026337	-0.86506	-0.055834
b2	-0.800293	0.118506	-6.75317	0.000000	-1.03683	-0.563753
b3	-0.043443	0.027970	-1.55319	0.125089	-0.09927	0.012386
b4	0.910843	0.326372	2.79081	0.006842	0.25940	1.562285
b5	-0.080658	0.089235	-0.90388	0.369296	-0.25877	0.097456
b6	0.091643	0.107783	0.85025	0.398213	-0.12349	0.306780

a

	Estimate	Standard error	t-value df = 64	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	-6.623	9.7587	-0.67870	0.499775	-26.119	12.8720
a1	122.551	160.7837	0.76221	0.448734	-198.651	443.7538
a2	-130.686	174.3732	-0.74946	0.456327	-479.036	217.6650
a3	0.194	0.0561	3.45506	0.000982	0.082	0.3058
b1	-44.067	57.1214	-0.77145	0.443277	-158.180	70.0465
b2	94.482	125.2690	0.75424	0.453473	-155.771	344.7360
b3	-0.076	0.0334	-2.28784	0.025461	-0.143	-0.0097
b4	-43.893	58.4670	-0.75073	0.455566	-160.694	72.9082
b5	-0.090	0.1225	-0.73417	0.465523	-0.335	0.1547
b6	0.090	0.1310	0.68616	0.495088	-0.172	0.3517
c1	9.937	12.9628	0.76656	0.446159	-15.959	35.8330
c2	-13.339	17.5810	-0.75874	0.450791	-48.462	21.7826
c3	0.014	0.0124	1.12913	0.263059	-0.011	0.0388

b

Рис. 7. Параметры квадратичной (a) и кубической (b) регрессий до исключения слагаемых с p -уровнем выше 0,05

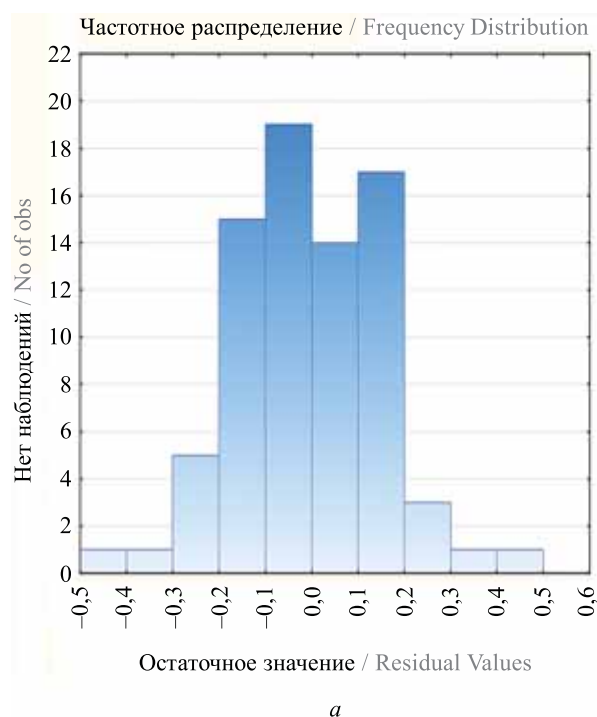
Fig. 7. Parameters of quadratic (a) and cubic (b) regressions before the exclusion of summands with p -level less than 0.05

	Estimate	Standard error	t-value df = 70	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	0,649832	0,035322	18,3974	0,000000	0,57938	0,720280
a2	2,138836	0,066758	32,0384	0,000000	2,00569	2,271982
a3	0,192937	0,027741	6,9549	0,000000	0,13761	0,248265
b1	-0,543651	0,131737	-4,1268	0,000100	-0,80639	-0,280910
b2	-0,879438	0,086766	-10,1357	0,000000	-1,05249	-0,706388
b3	-0,064656	0,010704	-6,0402	0,000000	-0,08601	-0,043307
b4	1,051103	0,256039	4,1052	0,000108	0,54045	1,561757

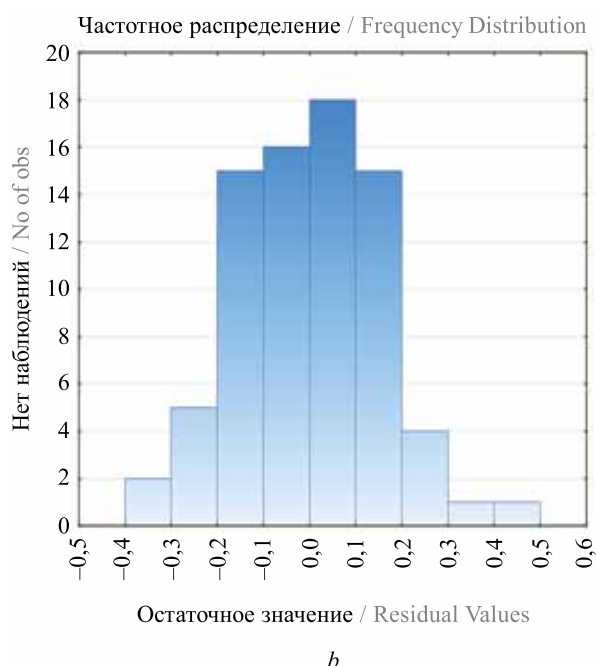
a

Model is: $v_0 = a_0 + a_1 \cdot x_3 + a_2 \cdot x_5 + b_1 \cdot x_3^2 + b_2 \cdot x_4^2 + b_3 \cdot x_5^2 + c_1 \cdot x_3$ Dep. Var.: Q Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 69	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	0,66105	0,110727	5,9701	0,000000	0,44015	0,88194
a1	2,04433	0,123587	16,5415	0,000000	1,79778	2,29088
a2	0,23140	0,042833	5,4024	0,000001	0,14595	0,31685
b1	-1,27429	0,124484	-10,2365	0,000000	-1,52263	-1,02595
b2	0,65065	0,091105	7,1418	0,000000	0,46890	0,83240
b3	-0,07108	0,015516	-4,5815	0,000020	-0,10204	-0,04013
c1	0,21140	0,028182	7,5010	0,000000	0,15517	0,26762
c2	-0,18843	0,022248	-8,4694	0,000000	-0,23281	-0,14404

b

Рис. 8. Параметры квадратической (a) и кубической (b) регрессий после исключения слагаемых с p -уровнем выше 0,05Fig. 8. Parameters of quadratic (a) and cubic (b) regressions after the exclusion of summands with p -level less than 0.05

a



b

Рис. 9. Гистограммы распределения остатков для квадратической (a) и кубической (b) регрессий

Fig. 9. Residuals value histograms of quadratic (a) and cubic (b) regressions

Results: Spreadsheet27	
Model is: $v_0 = a_0 + a_1 \cdot x_3 + a_2 \cdot x_5 + b_1 \cdot x_3^2 + b_2 \cdot x_4^2 + b_3 \cdot x_5^2 + c_1 \cdot x_3 + c_2 \cdot x_4$	Independent variables: 3
Dependent variable: Q	
Loss function: least squares	
Final value: 1,87946322	
Proportion of variance accounted for: ,97627022	R = ,98755771

a

Results: Spreadsheet27	
Model is: $v_0 = a_0 + a_1 \cdot x_3 + a_2 \cdot x_5 + b_1 \cdot x_3^2 + b_2 \cdot x_4^2 + b_3 \cdot x_5^2 + c_1 \cdot x_3 + c_2 \cdot x_4$	Independent variables: 3
Dependent variable: Q	
Loss function: least squares	
Final value: 1,80907253	
Proportion of variance accounted for: ,97620957	R = ,98002318

b

Рис. 10. Статистические показатели квадратической (a) и кубической (b) регрессий

Fig. 10. Statistical indicators of quadratic (a) and cubic (b) regressions

Искомые уравнения регрессий будут иметь следующий вид:

- для квадратичной регрессии:

$$y = 0,649832 + 2,138836x_4 + 0,192937x_5 - 0,543651x_3^2 - 0,879438x_4^2 - 0,064656x_5^2 + 1,051103x_3x_4; \quad (6)$$

- для кубической регрессии:

$$y = 0,66105 + 2,04433x_3 + 0,2314x_5 - 1,27429x_3^2 + 0,65065x_4^2 - 0,07108x_5^2 + 0,21140x_3^3 - 0,18843x_4^3. \quad (7)$$

Коэффициенты, полученные для независимых переменных, показали, что регрессии по-разному

оценивают степень влияния фактор-переменных: для квадратичной регрессии переменная x_4 имеет наибольшее влияние, а x_5 является следующей по степени влияния на целевую функцию, для кубической регрессии такими фактор-переменными выступают x_3 и x_5 соответственно.

Для оценки качества построенных регрессионных уравнений был проведен анализ остатков — один из самых важных элементов подобных анализов [27]. На приведенных ниже гистограммах видно, что остатки имеют близкие к нормальным законы распределения (рис. 9), что в свою очередь говорит об адекватности исследуемых зависимостей.

По полученным статистическим показателям (рис. 10) видно, что обе регрессии имеют близкую связь между предиктором и откликом, но кубическая регрессия показывает несколько лучшее качество предсказания.

Точность прогнозирования результатов с помощью квадратической и кубической регрессий оценивалась так же, как и для ИНС при помощи вычисления относительной погрешности. Для обеих регрессий значения погрешностей были близки между собой и составили 28,62 и 28,6 % соответственно, что значительно больше погрешности, вычисленной для ИНС (один из результатов в каждой регрессии составил более 55 000 % и отнесен к вы-

бросам, относительная погрешность оценивалась без их учета).

Затем для подтверждения адекватности моделей, использованных при прогнозировании величины разрушающей нагрузки, выполнен аналогичный анализ на пяти дополнительных образцах (табл. 2). Результат прогноза оказался лучше для модели на основе ИНС, относительная погрешность составила 8,4 %.

Затем метод прогнозирования результатов эксперимента с помощью ИНС, показавший существенно более высокую точность, был применен для обработки опытных данных без их предварительной нормализации. Используя описанную выше методику создания ИНС, получаем ряд ИНС и отбираем среди них имеющую наилучшую точность прогноза (рис. 11).

Отобранная из приведенных выше ИНС (выделена зеленой рамкой на рис. 11) включает 10 скрытых нейронов в скрытом слое. Функцией активации для скрытого и выходного слоев является экспонента (рис. 12). На рис. 13 приведен график зависимости полученных и прогнозных значений разрушающей нагрузки. Точки на графике достаточно плотно группируются вокруг диагональной линии, т.е. полученная модель хорошо согласуется с результатами эксперимента. Относительная погрешность при прогнозировании результатов эксперимента составила в среднем 6,62 % (табл. 3).

Табл. 2. Характеристики дополнительных балок других авторов

Table 2. Parameters and shear capacity of the beams of other authors

1	Г.С. Алиев [28] G.S. Aliyev [28]	БТ-II-1(а)	2	90	42	330	16	1,75	200	102,5
2		БТ-II-1(б)	2	90	43	330	16	1,36	200	95
3		БО-II-3	2	90	45	330	18	1,63	200	106,9
4	А.Р. Абдуллаев [29]	БД-I-3	3	90	51	322	22,2	1,48	200	118,1
5	A.R. Abdullaev [29]	БД-I-3д	3	90	52	320	20	1,46	200	114,9

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation p...	Algorithm	Error funct.	Hidden act.	Output act.
MLP 7-3-1	0,888119	0,994630	0,955667	BFGS 29	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-7-1	0,994747	0,994829	0,988939	BFGS 118	SOS	Exponential	Exponential
MLP 7-2-1	0,987204	0,993003	0,979009	BFGS 140	SOS	Exponential	Logistic
MLP 7-7-1	0,995988	0,990811	0,960082	BFGS 29	SOS	Exponential	Identity
MLP 7-17-1	0,995397	0,993406	0,976269	BFGS 26	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-9-1	0,996234	0,996689	0,980273	BFGS 46	SOS	Exponential	Tanh
MLP 7-4-1	0,996358	0,993408	0,990397	BFGS 51	SOS	Tanh	Identity
MLP 7-10-1	0,994308	0,982098	0,955906	BFGS 26	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-10-1	0,993394	0,992357	0,992060	BFGS 77	SOS	Exponential	Exponential

Рис. 11. Характеристики полученных ИНС

Fig. 11. Characteristics of the obtained ANN

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 7-10-1	0,993394	0,992357	0,992060	90,15831	76,17756	198,2134	BFGS 77	SOS	Exponential	Exponential

Рис. 12. Характеристики отобранной ИНС

Fig. 12. Parameters of the selected ANN

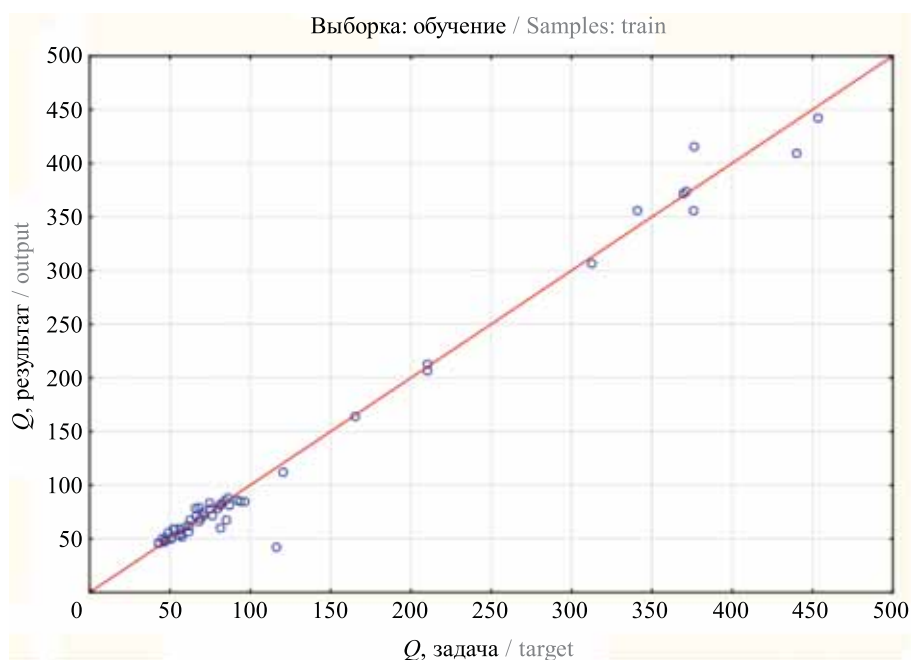
Рис. 13. Зависимость между фактическим и прогнозным значениями Q_{ult} Fig. 13. Relationship between the actual and predicted value of Q_{ult}

Табл. 3. Сравнение фактических данных и результатов прогнозирования с помощью ИНС

Table 3. Experimental data vs. ANN predicted results

Фактически разрешенная нагрузка Q_{ult} , кН Test failure load Q_{ult} , кН	Разрешенная нагрузка по данным ИНС $Q_{ult,p}$, кН ANN shear failure load $Q_{ult,p}$, кН	Относительная погрешность, % Relative error, %	Фактически разрешенная нагрузка Q_{ult} , кН Test failure load Q_{ult} , кН	Разрешенная нагрузка по данным ИНС $Q_{ult,p}$, кН ANN shear failure load $Q_{ult,p}$, кН	Относительная погрешность, % Relative error, %
88,70	91,64	3,32	70,5	73,61	4,41
68,10	72,44	6,38	42,7	46,23	8,26
91,60	96,16	4,98	47,1	47,67	1,20
75,00	68,69	8,41	51,2	51,30	0,19
65,70	69,69	6,08	57,1	54,08	5,29
81,80	83,24	1,76	48,1	46,84	2,63
96,50	90,42	6,30	50,3	48,56	3,47
66,00	80,56	22,06	44,8	50,02	11,66
68,90	70,37	2,13	55,4	52,57	5,10
71,90	73,20	1,81	42,5	45,09	6,09
84,80	66,85	21,17	48,7	46,53	4,46
68,00	61,40	9,70	47,2	47,16	0,07
86,60	83,47	3,61	47,4	48,09	1,45
64,00	83,20	30,00	42,8	44,53	4,05
80,70	83,47	3,44	50,1	45,22	9,74
85,60	90,94	6,24	46,3	46,27	0,07
73,80	89,64	21,46	56,2	49,03	12,76
93,40	87,25	6,58	65,1	72,66	11,61

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Фактически разрешенная нагрузка Q_{ult} , кН Test failure load Q_{ult} , кН	Разрешенная нагрузка по данным ИНС $Q_{ult,p}$, кН ANN shear failure load $Q_{ult,p}$, кН	Относительная погрешность, % Relative error, %	Фактически разрешенная нагрузка Q_{ult} , кН Test failure load Q_{ult} , кН	Разрешенная нагрузка по данным ИНС $Q_{ult,p}$, кН ANN shear failure load $Q_{ult,p}$, кН	Относительная погрешность, % Relative error, %
52,10	56,88	9,17	74,5	78,53	5,40
56,20	57,21	1,79	62,5	65,65	5,04
53,40	56,39	5,60	70,8	70,67	0,18
81,40	58,38	28,28	453,1	455,19	0,46
48,90	52,01	6,35	371	371,22	0,06
61,90	63,66	2,84	369,1	366,66	0,66
59,60	61,69	3,50	416	417,47	0,35
59,60	62,40	4,70	376	410,22	9,10
62,90	68,74	9,29	440	411,39	6,50
78,10	80,43	2,99	277,5	346,72	24,94
82,70	85,33	3,18	341	350,14	2,68
84,10	87,15	3,63	375,5	354,71	5,54
120	126,68	5,57	292	296,88	1,67
225	272,91	21,29	312,5	315,12	0,84
210	205,28	2,25	311,5	326,23	4,73
210	211,41	0,67	77,4	57,47	25,75
165	163,54	0,88	71,5	59,54	16,72
80	79,14	1,07	61,7	57,57	6,69
116	115,42	0,50	62,1	63,13	1,66
54,9	49,98	8,97	76,2	74,48	2,26
57,6	52,70	8,50	Среднее значение Mean value		6,62

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты отечественных и зарубежных исследований указывают на возможность применения ИНС для решения сложных, трудно формализуемых задач расчета строительных конструкций. В представленной работе ИНС впервые применены для прогнозирования прочности тонкой стенки армированных бетонных балок в зоне действия поперечных сил. Для объективной оценки результатов расчетов при помощи ИНС база экспериментальных данных включала образцы с варьируемыми в широких диапазонах исходными параметрами и величинами разрушающих нагрузок.

Прогнозирование ИНС показало хорошую сходимость с результатами натурных испытаний из рассмотренной выборки — средняя погрешность расчетов составила 6,62 %. Модель ИНС была опробована на натурных испытаниях, не задействованных

при ее обучении и тестировании. Здесь расчеты при помощи ИНС также показали хорошие результаты — средняя величина погрешности составила 8,4 %. Точность расчетов при помощи ИНС сравнивалась с точностью регрессионного анализа по предварительно нормализованным данным. Средняя погрешность расчетов по ИНС оказалась примерно в 2,5 раза ниже, чем для регрессионного анализа.

Результаты выполненной работы позволяют заключить, что предложенный способ математического моделирования ИНС применим для расчетов прочности стенки приопорных участков тавровых и двутавровых армированных бетонных балок. Кроме того, расчеты средствами ИНС могут послужить новым инструментом для проведения численных экспериментов, направленных на исследование влияния варьируемых конструктивных и нагрузочных параметров на несущую способность балок при действии поперечных сил.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang T., Oehlers D.J., Visintin P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups // *Journal of Composites for Construction*. 2014. Vol. 18. Issue 5. P. 04014007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000469
2. Razaqpur A.G., Spadea S. Shear strength of FRP reinforced concrete members with stirrups // *Journal of Composites for Construction*. 2014. Vol. 19. Issue 1. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000483
3. Peng F., Xue W., Xue W. Database evaluation of shear strength of slender fiber-reinforced polymer-reinforced concrete members // *ACI Structural Journal*. 2020. Vol. 117. Issue 3. Pp. 273–282. DOI: 10.14359/51723504
4. Zaman A., Gutub S.A., Wafa M.A. A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32. Issue 24. Pp. 1966–1988. DOI: 10.1177/0731684413492868
5. Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 12. С. 1663–1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672
6. El-Sayed A.K., Soudki K. Evaluation of shear design equations of concrete beams with FRP reinforcement // *Journal of Composites for Construction*. 2011. Vol. 15. Pp. 9–20. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000158
7. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with and without Basalt FRP Stirrups // *Journal of Composites for Construction*. 2016. Vol. 20. Issue 4. P. 04015083. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638
8. Тамов М.М. Прочность тонких стенок железобетонных балок на приопорных участках с учетом предыстории загрузки : дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2013. 208 с.
9. Усанов С.В., Тамов М.М. Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базальтокомпозитной арматуры // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 4 (88). С. 344–361.
10. Волков А.Н. Исследование и разработка методов построения инфраструктуры и предоставления услуг сетей связи на основе технологий искусственного интеллекта : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 194 с.
11. Домышев А.В. Оптимизация нормальных электрических режимов электроэнергетических систем при оперативном и автоматическом управлении : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2020. 188 с.
12. Дуденков В.М. Разработка нейросетевых моделей человеко-машинного общения : дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2016. 131 с.
13. Abdalla J.A., Elsanosi A., Abdelwahab A. Modeling and simulation of shear resistance of R/C beams using artificial neural network // *Journal of the Franklin Institute*. 2007. Vol. 344. Pp. 741–756. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2005.12.005
14. Bashir R., Ashour A. Neural network modelling for shear strength of concrete members reinforced with FRP bars // *Composites: Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. Issue 8. Pp. 3198–3207. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.011
15. Sharifi Y., Moghbeli A., Hosseinpour M., Sharifi H. Neural networks for lateral torsional buckling strength assessment of cellular steel I-beams // *Advances in Structural Engineering*. 2019. Vol. 22. Issue 3. Pp. 1–13. DOI: 10.1177/1369433219836176
16. Гинзбург А.В., Рыжкова А.И. Возможности искусственного интеллекта по повышению организационно-технологической надежности строительного производства // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 7–13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13
17. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual strength of corroded reinforced concrete beams using an adaptive model based on ANN // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. Vol. 9. Issue 2. Pp. 159–172. DOI: 10.1007/s40069-015-0097-4
18. Afrifa R.O., Adom-Asamoah M., Owusu-Ansah E. Artificial neural network model for low strength RC beam shear capacity // *Journal of Science and Technology*. 2012. Vol. 32. Issue 2. Pp. 119–132. DOI: 10.4314/jst.v32i2.13
19. Perera R., Barchin M., Arteaga A., Diego A. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks // *Composites Part B-engineering*. 2010. Vol. 41. Pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.03.003
20. Leonhardt F., Walther R. The Stuttgart shear tests. Cement and Concrete Association, London, UK, 1964. 134 p.
21. Rangan B.V. Web crushing strength of reinforced and prestressed concrete beams // *ACI Structural Journal*. 1991. Vol. 88. Issue 1. Pp. 12–16. DOI: 10.14359/3050
22. Ahmed E.A., El-Salakawy E.F., Benmokrane B. Shear performance of RC bridge girders reinforced with carbon FRP stirrups // *Journal of Bridge Engineering*. 2010. Vol. 15. Pp. 44–45. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000035
23. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000. Vol. 27. Pp. 859–872. DOI: 10.1139/L00-004
24. Ashteyat A., Obaidat Y.T., Murad Y.Z., Haddad R. Compressive strength prediction of lightweight short columns at elevated temperature using gene expres-

sion programing and artificial neural network // Journal of Civil Engineering and Management. 2020. Vol. 26. Issue 2. Pp. 189–199. DOI: 10.3846/jcem.2020.11931

25. Ahmad A., Cotsovos D.M., Lagaros N.D. Framework for the development of artificial neural networks for predicting the load carrying capacity of RC members // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. Pp. 1–21. DOI: 10.1007/s42452-020-2353-8

26. Mansour M.Y., Dicleli M., Lee J.Y., Zhang J. Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks // Engineering Structures. 2004. Vol. 26. Pp. 781–799. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.01.011

27. Чурилова Э.Ю., Салин В.Н. Статистический анализ данных цифровой экономики в системе «STATISTICA». М. : КноРус, 2019. 238 с.

28. Алиев Г.С. Прочность и трещиностойкость стенок двутавровых железобетонных балок из тяжелого и облегченного бетонов при действии поперечных сил : дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1979. 151 с.

29. Абдуллаев А.Р., Алиев Г.С., Батдалов М.М. Исследование влияния продольного обжатия на прочность стенки двутавровых железобетонных элементов при действии поперечных сил // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 2 (138). С. 87–89.

Поступила в редакцию 10 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 31 августа 2022 г.

Одобрена для публикации 31 августа 2022 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Мурат Мухамедович Тамов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, РИНЦ ID: 800695, Scopus: 57205126163, ResearcherID: AAO-9436-2020, ORCID: 0000-0001-8235-2314; murat.tamov@gmail.com;

Ольга Валентиновна Руденко — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей математики; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 653918, ORCID: 0000-0002-1831-621X; olga_ned@mail.ru, +7-903-450-65-44;

Сергей Владимирович Усанов — старший преподаватель кафедры строительных конструкций; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 1157225, ORCID: 0000-0002-3420-4111; svusanov@gmail.com.

Вклад авторов:

Тамов М.М. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Руденко О.В. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста.

Усанов С.В. — написание статьи, построение и анализ моделей, сбор и обработка данных, редактирование статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhang T., Oehlers D.J., Visintin P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2014; 18(5):04014007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000469
2. Razaqpur A.G., Spadea S. Shear strength of FRP reinforced concrete members with stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2014; 19(1). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000483
3. Peng F., Xue W., Xue W. Database evaluation of shear strength of slender fiber-reinforced polymer-reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*. 2020; 117(3):273-282. DOI: 10.14359/51723504
4. Zaman A., Gutub S.A., Wafa M.A. A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. *Journal of Reinforced*

Plastics and Composites. 2013; 32(24):1966-1988. DOI: 10.1177/0731684413492868

5. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(12):1663-1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672 (rus.).

6. El-Sayed A.K., Soudki K. Evaluation of shear design equations of concrete beams with FRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*. 2011; 15:9-20. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000158

7. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2016; 20(4):04015083. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638

8. Tamov M.M. *Strength of thin webs of reinforced concrete beams at the shear span, taking into account the preliminary loading : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Krasnodar, 2013; 208. (rus.).
9. Usanov S.V., Tamov M.M. Crack resistance at the shear span of the I-shaped beams with using basalt fibre reinforced bars as a transverse reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2022; 4(88):344-361. (rus.).
10. Volkov A.N. *Research and development of methods for building infrastructure and providing services of communication networks based on artificial intelligence technologies : dis. ... candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg, 2021; 194. (rus.).
11. Domyshv A.V. *Optimization of normal electrical modes of electric power systems with operational and automatic control : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Irkutsk, 2020; 188. (rus.).
12. Dudenkov V.M. *Development of neural network models of human-machine communication : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Voronezh, 2016; 131. (rus.).
13. Abdalla J.A., Elsanosi A., Abdelwahab A. Modeling and simulation of shear resistance of R/C beams using artificial neural network. *Journal of the Franklin Institute*. 2007; 344:741-756. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2005.12.005
14. Bashir R., Ashour A. Neural network modelling for shear strength of concrete members reinforced with FRP bars. *Composites: Part B: Engineering*. 2012; 43(8):3198-3207. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.011
15. Sharifi Y., Moghbeli A., Hosseinpour M., Sharifi H. Neural networks for lateral torsional buckling strength assessment of cellular steel I-beams. *Advances in Structural Engineering*. 2019; 22(3):1-13. DOI: 10.1177/1369433219836176
16. Ginzburg A.V., Ryzhkova A.I. Artificial intelligence capabilities for increasing organizational technological reliability of construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2018; 13(1):7-13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13 (rus.).
17. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual strength of corroded reinforced concrete beams using an adaptive model based on ANN. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015; 9(2):159-172. DOI: 10.1007/s40069-015-0097-4
18. Afrifa R.O., Adom-Asamoah M., Owusu-Ansah E. Artificial neural network model for low strength RC beam shear capacity. *Journal of Science and Technology*. 2012; 32(2):119-132. DOI: 10.4314/jst.v32i2.13
19. Perera R., Barchin M., Arteaga A., Diego A. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks. *Composites Part B-engineering*. 2010; 41:287-298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.03.003
20. Leonhardt F., Walther R. *The Stuttgart shear tests*. Cement and Concrete Association, London, UK, 1964; 134.
21. Rangan B.V. Web Crushing Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Beams. *ACI Structural Journal*. 1991; 88(1):12-16. DOI: 10.14359/3050
22. Ahmed E.A., El-Salakawy E.F., Benmokrane B. Shear performance of RC bridge girders reinforced with carbon FRP Stirrups. *Journal of Bridge Engineering*. 2010; 15:44-45. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000035
23. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000; 27:859-872. DOI: 10.1139/L00-004
24. Ashteyat A., Obaidat Y.T., Murad Y.Z., Haddad R. Compressive strength prediction of lightweight short columns at elevated temperature using gene expression programming and artificial neural network. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2020; 26(2):189-199. DOI: 10.3846/jcem.2020.11931
25. Ahmad A., Cotsovos D.M., Lagaros N.D. Framework for the development of artificial neural networks for predicting the load carrying capacity of RC members. *SN Applied Sciences*. 2020; 2:1-21. DOI: 10.1007/s42452-020-2353-8
26. Mansour M.Y., Diceli M., Lee J.Y., Zhang J. Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks. *Engineering Structures*. 2004; 26:781-799. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.01.011
27. Churilova E.Y., Salin V.N. *Statistical analysis of digital economy data in the system "STATISTICA"*. Moscow, KnoRus, 2019; 238. (rus.).
28. Aliev G.S. *Shear strength and shear crack resistance of the webs of reinforced concrete beams of normal and light-weight concrete : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Rostov-on-Don, 1979; 151. (rus.).
29. Abdullaev A.R., Aliev G.S., Batdalov M.M. Researches of the influence of longitudinal compressive forces on durability of the wall of flange ferro-concrete elements under the influence of cross forces. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2007; 2(138):87-89. (rus.).

Received July 10, 2022.

Adopted in revised form on August 31, 2022.

Approved for publication on August 31, 2022.

BIONOTES: **Murat M. Tamov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar,

350072, Russian Federation; ID RISC: 800695, Scopus: 57205126163, ResearcherID: AAO-9436-2020, ORCID: 0000-0001-8235-2314; murat.tamov@gmail.com;

Olga V. Rudenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Mathematics; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2, st. Moskovskaya, Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RISC: 653918, ORCID: 0000-0002-1831-621X; olga_ned@mail.ru;

Sergey V. Usanov — senior lecturer at chair of building structures; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RISC: 1157225, ORCID: 0000-0002-3420-4111; svusanov@gmail.com.

Contribution of the authors:

Murat M. Tamov — scientific supervision, concept of research, finalization of the text, conclusions.

Olga V. Rudenko — scientific supervision, concept of research, finalization of the text.

Sergey V. Usanov — writing of the original text, creation and analysis of the models, data collection and processing, paper editing, conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.

Prediction of the castellated beams deflections

Alexej I. Pritykin^{1,2}

¹ Kalinigrad State Technical University (KSTU); Kaliningrad, Russian Federation;

² Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU); Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Existence of openings in webs of beams reduce their shear rigidity and increase deflections compare with beams of the same dimensions with solid web. Investigation of the castellated beam's deflections is important, because one of main demands to beams of engineering structures is guarantee of necessary rigidity, i.e. restriction of ratio deflection to length. In the work it was studied deflections of castellated beams with diamond shape, hexagonal, sinusoidal and circular openings, widely used in structural industry.

Materials and methods. Effect of openings on transverse deflections of the castellated steel beams was studied analytically with theory of composite bars, with the finite element method and experimentally on four meters' double consoled beams under loading with concentrated forces applied at consoles.

Results. Universal analytical relation was obtained which allow reliably evaluate deflections of simply supported beams with various shape of openings under different kind of loading. Analysis of results of calculation of beams by FEM using program complex ANSYS demonstrates satisfactory correspondence to experimental data and to analytical relations.

Conclusions. Obtained with the theory of composite bars analytical dependences for deflections of simply supported beams are applicable for beams with various type of perforation and different kind of loading.

KEYWORDS: deflections, castellated beams, diamond shape, hexagonal, sinusoidal and circular openings, analytical solution, experiment, FEM

FOR CITATION: Pritykin A.I. Prediction of the castellated beams deflections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1160-1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1160-1174 (rus.).

Corresponding author: Alexej I. Pritykin, prit_alex@mail.ru.

Определение прогибов перфорированных балок

Алексей Игоревич Притыкин^{1,2}

¹ Калининградский государственный технический университет (КГТУ); г. Калининград, Россия;

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта);
г. Калининград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наличие вырезов в стенках балок снижает их сдвиговую жесткость и увеличивает прогибы по сравнению с балками таких же размеров со сплошной стенкой. Исследование прогибов перфорированных балок важно, так как одним из основных требований к балкам инженерных сооружений является обеспечение необходимой жесткости, т.е. ограничение отношения прогиба к длине. Изучены прогибы перфорированных балок с ромбовидными, шестиугольными, синусоидальными и круглыми вырезами, широко применяемыми в строительстве.

Материалы и методы. Эффект вырезов на поперечный изгиб перфорированных балок исследовался аналитически с использованием теории составных стержней, методом конечных элементов (МКЭ) и экспериментально на стальных четырехметровых двухконсольных стальных балках при нагружении сосредоточенными силами на консолях.

Результаты. Получено универсальное аналитическое решение, позволяющее надежно оценивать прогибы шарнирно опертых балок с разной формой вырезов при разных видах нагружения. Анализ результатов расчета балок, выполненных МКЭ с помощью программного комплекса ANSYS, показал удовлетворительное соответствие данных экспериментов и расчетных зависимостей.

Выводы. Полученные по теории составных стержней зависимости применимы для балок с относительной длиной больше десяти.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогиб, перфорированная балка, ромбовидные, шестиугольные, синусоидальные и круглые вырезы, теория составных стержней, МКЭ, эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Притыкин А.И. Prediction of the castellated beams deflections // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1160–1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1160-1174

Автор, ответственный за переписку: Алексей Игоревич Притыкин, prit_alex@mail.ru.

INTRODUCTION

A big number of studies as foreign [1–17], so and Russian authors [18–25] are dedicated to investigation of the castellated beams deflections, because one of main demands to beams of engineering structures is guarantee of necessary rigidity, i.e. restriction of ratio deflection to length.

In some studies, only experimental investigations of deflections [1–5] were carried out, in another it was used FEM calculations [6, 7, 9–14]. First analytical solution for deflections of castellated beams based on Vierendeel scheme have been published in 1957 [2]. In [2] it was considered theoretically and by tests the deflections of the hexagonal castellated beams, which were used under construction of 30-m highway bridge in state Texas. Later improved formula for the Vierendeel scheme was obtained in [8].

In studies [15] and [16] was applied the principle of minimum potential energy for analytical solution of elastic deflections of castellated beams with hexagonal openings. In [16] for improving of accuracy of solution the coefficient of the shear rigidity was determined with help of calculations by FEM using software ANSYS. It was indicated, that for short beams error of calculations does not exceed 6 %.

In Russian practice almost all studies on deflections of castellated beams [19–24] are based on the theory of composite bars (TCB), elaborated in [18]. In [21, 22] analytical solution of problem of simply supported castellated beam with hexagonal openings performed with help of TCB is in good correlation with results obtained by FEM and experimental data. Deflections of castellated beams with sinusoidal openings were considered analytically in [24]. In [25] for obtaining of deflections of beams with circular openings, subjected to uniformly distributed load have applied the energy method Timoshenko.

In spite of big number of studies, the European structural standards do not contain formulas for calculation of deflections of castellated beams. Initially in Eurocode 3 (1993)¹ it was annex N “Openings in web of beams”, in which considered empirical relation, based on Vierendeel scheme for deflections of castellated beams, but later in Eurocode 3 (2005) this relation was omitted as not reliable. Only in Russian structural standard² there are recommendations on analytical determination of deflections of castellated beams with hexagonal openings.

From performed review it is clear that there are three analytical approaches to prediction of deflections of castellated beams: the Vierendeel scheme; the theory of

composite bars; the principle of minimum potential energy. From numerical methods the most efficient is the finite elements method.

Although the finite element method allows to predict rather exactly deflections of castellated beams it demands at first, rather expensive program complexes, for example, such as NASTRAN, ABAQUS or ANSYS, and secondly, it is need a qualified personal, as even small mistake in initial data can bring to serious distortion of results. That is why application of analytical relations, allowing operatively evaluate rigidity of beams of different constructive design using only tabular processor Excel, is always preferable.

Aim of this study is to obtain analytical relations for the castellated beams deflections with hexagonal, diamond shaping, circular and sinusoidal openings and compare obtained solutions with results by FEM and experimental data.

MATERIALS AND METHODS

Solution of problem of the castellated beam's deflections was performed with three methods: analytical, based on application of the theory of composite bars, numerical calculations by the finite elements method, using program complex ANSYS and experimental tests on steel models.

In the analytical approach based on application of TCB a castellated beam was considered as composed of two T-shaped bars joined each other with elastic lay formed by web-posts between openings. Differential equation of flexure of such beam were solved in series of Fourier, high convergence of which allow to keep only one term in series. Kind of perforation is taking into account only with coefficient of rigidity of elastic lay.

Numerical calculations of beams were performed by FEM using ANSYS software. The models of beams were composed of plane quadrilateral finite elements Shell63. As accuracy of calculation by FEM depends on dimensions of FE for adequate description of model the size of FE was tied with radius of fillet of openings. Performed analysis showed that for sinusoidal openings satisfactory description of contour can be reached under sizes of FE approximately equal to 0.2 of radius of opening. In calculations sizes of FE were equal to $\Delta_{FE} \approx 0.05H$. For reducing of dimensions of system of equations and respectively time of calculation in program it was taking into account symmetry of structure. That is why it was considered only half of beam. All beams were simply supported and loaded with uniformly distributed load or by concentrated forces.

Although the finite elements method allows rather reliably appreciate accuracy of obtained analytical relation in the study it was also performed experiments on beams with diamond shaping and hexagonal openings of regular shape. Experiments allow define more precisely influence such factors as inexactitude fabrication of construction, existence of initial deformations, influence

¹ Eurocode 3. ENV 1993-1-1:1993. Design of steel structures. Annex N: Openings in webs. European Committee for Standardization.

² SP 294.1325800.2017. The construction of steel. Design rules. 198 p.

of residual stresses and so on. Research was conducted on four meter's steel beams, having two consoles with 1.5 m length each loaded via dynamometers by concentrated forces.

RESULTS OF THE RESEARCH

Calculation of beams with the theory of composite bars

Before to consider the castellated beams we pay attention on peculiarities of deformation of beams with solid web, which will be denoted as $l - H - t_w - b_f - t_f$ where incoming magnitudes are interpreted as: l is length of beam, H is depth of beam, t_w is thickness of web, b_f is width of flange, t_f is thickness of flange.

As it is shown in [24], full deflection of simply supported beam with solid web under uniformly distributed load is determining as sum of deflection caused by bending moment and deflection due to shear force:

$$w_{\max} \approx w_{\max}^{TT} \left(1 + 12.5(H/l)^2 \left(1/6 + A_f/A_w \right) \right), \quad (1)$$

where $w_{\max}^{TT}$ is deflection of beam under distributed load, determined on technical theory of flexure; $A_f = b_f t_f$ is area of flange; $A_w = h_w t_w$ is area of web ($h_w = H - t_f$ is calculated depth of web).

From relation (1) it is clear the influence of shear is stronger with increasing the ratio A_f/A_w , because existence

of perforation of web reduce value A_w , then influence of shear is growing. For simply supported beams increasing of deflection due to shear can reach 30%, and for clamped beams this increasing can be equal 1.5–2 times compare to deflections of beams the same dimensions with plane web. The bigger ratio l/H the less role of shear.

For evaluation of rigidity it is important to know what effect from shear on deflection of beam produce perforation. It will be considered beams of a few constructive designs with diamond shaping openings (Fig. 1, a), with hexagonal openings (Fig. 1, b), with sinusoidal openings (Fig. 1, c) and with circular openings (Fig. 1, d). In this article it was used three methods of calculations of the castellated beams deflections: theory of composite bars; the finite element method and experiment.

For designation of dimensions of castellated beam with diamond shaping openings in the work is using next form of writing: $l - H - t_w - b_f - t_f - \beta - \xi - \vartheta$, in which $\beta = h/H$ is relative depth of openings; $\xi = c/a$ is relative width of web-posts (c is size of horizontal side, a is inclined side of opening); ϑ is angle of inclination of sides of hexagon to horizontal axis (Fig. 2). In this work the diamond shaping openings with angle of inclination of sides $\vartheta = 60^\circ$ is only considering. For beams with diamond shaping openings relative width of web-posts ξ can be changing in diapason $0.2 \leq \xi \leq 0.8$. Under width of web-post $c = a$, i.e. under $\xi = 1$, we have case of classic perforation with hexagonal openings of regular shape (Fig. 1, b).

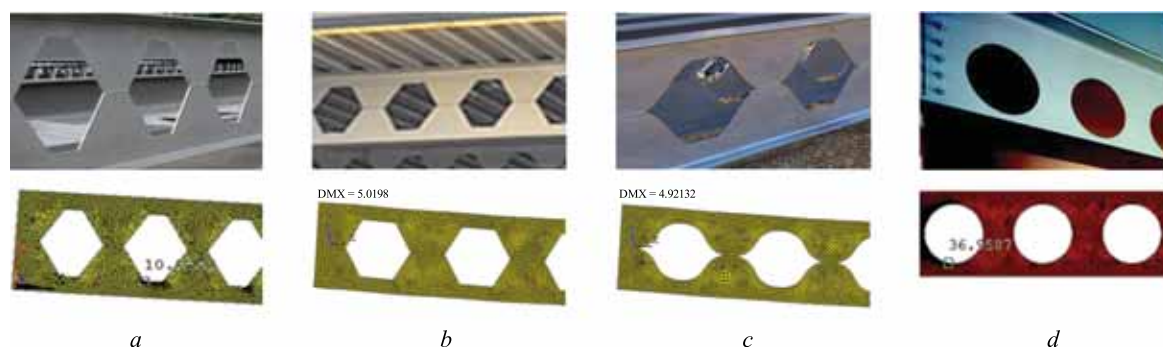


Fig. 1. Shapes of openings in castellated beams: a — diamond shaping; b — hexagonal; c — sinusoidal; d — circular

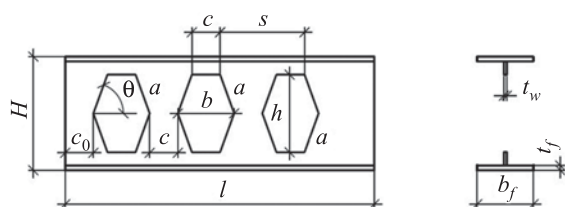


Fig. 2. Denominations for castellated beam with diamond shaping openings

Scheme of calculation in the theory of composite bars imply existence of two T-section bars (Fig. 2) and

elastic lay, formed by web-posts. Differential equation of composite bar in [22] was obtained in form:

$$w'''' - \frac{I_0 K_c}{E A I_t} w'' = \frac{M''}{E I_t} - \frac{M K_c}{E^2 A I_t}, \quad (2)$$

where w is deflection of beam; I_0 is moment of inertia for cross section with opening; K_c is coefficient of rigidity of elastic lay; E is Young's modulus; A is area of T-section above opening; I_t is moment of inertia of T-section.

Solution of equation (2) was made in series Fourier for case of simply supported beam under uniformly distributed load q . Then the function of bending moment was decomposed in sinus series as:

$$M = \frac{ql^2}{8} \sum_{n=1,3} \frac{1}{n^3} \sin n\pi\eta \quad (3)$$

and function of the beam deflection w as:

$$w = \sum_{n=1,3} a_n \sin n\pi\eta. \quad (4)$$

Substitution (3) and (4) into (2) leads to form:

$$w = \frac{4ql^4}{\pi^5 EI_0} \sum_{n=1,3} \frac{I_0/2I_t + K_c^*/n^2}{n^5 (1 + K_c^*/n^2)} \sin n\pi\eta, \quad (5)$$

where $\eta = x/l$, and K_c^* is non-dimensional coefficient, determined as:

$$K_c^* = K_c l^2 I_0 / (\pi^2 E A I_t). \quad (6)$$

As show analysis of calculations of castellated beams by FEM, for simply supported beam with uniform load q , rather good results can be received with remaining only one term in series (5), changing under that factor $4/\pi^5$ on $5/384$. Then instead of (5) we get:

$$w_{cast} = \frac{5ql^4}{384EI_0} \frac{I_0/2I_t + K_c^*}{1 + K_c^*}. \quad (7)$$

First coefficient in (7) represents deflection w^{TT} of simply supported beam, determined according to technical theory of the beam's flexure:

$$w^{TT} = \frac{5ql^4}{384EI_0}. \quad (8)$$

Moment of inertia I_0 is calculating as:

$$I_0 = I_{pl} - h^3 t_w / 12, \quad (9)$$

where I_{pl} — moment of inertia of beam with plane web; h — depth of opening.

Moment of inertia I_{pl} is calculated as:

$$I_{pl} = b_f t_f (H - t_f)^2 / 2 + (H - 2t_f)^3 t_w / 12. \quad (10)$$

As in most cases $K_c^* > 100$, then in denominator of (7) it is possible to eliminate unit and to rewrite it in more compact form:

$$w_{cast} = w^{TT} (1 + I / 2I_t K_c^*). \quad (11)$$

Second item in brackets in (11) takes into account influence of shear of web, caused with perforation. After substitution of coefficient K_c^* (6) into (11) magnitude I_t is eliminating and equation transforms to:

$$w_{cast} = w^{TT} (1 + 0.5\pi^2 EA / K_c l^2). \quad (12)$$

Area of T-section A is calculating as:

$$A = t_f b_f + t_w (0.5(H - h) - t_f). \quad (13)$$

Obtained above relation (12) is applicable for any kind of perforation. Namely second term in brackets in (12) account the shear component of deflection. Different

kind of perforation is determining by the coefficient of rigidity of elastic lay K_c .

Coefficient of rigidity of elastic lay, formed with web-posts for beam with diamond shaping openings K_c can be calculated as:

$$K_c = G t_w / \alpha h, \quad (14)$$

where $G = E / 2(1 + \mu)$ is shear modulus; α is numerical coefficient, depending on kind of the beam supports (fixed one or simply supported).

For simply supported beam with diamond shaping openings the magnitude α can be adopted as $\alpha = 8.11$. Then relation (14) takes form:

$$K_c = G t_w / 8.11 \beta H. \quad (15)$$

Hence, deflection of castellated beam with diamond shaping openings can be calculated on (12) taking into account (15):

$$w_{rhom}^{TCB} = w^{TT} (1 + 104 \beta H A / t_w l^2). \quad (16)$$

Relation (16) is applicable to beams with diamond shaping openings in diapason of relative depth of openings $0.667 \leq \beta \leq 0.73$ and not depends on relative width of web-posts in diapason of $0.2 \leq \varepsilon \leq 0.8$. Note that for more accurate calculation in relation (16) moment of inertia I is calculated not at (9), but as effective one:

$$I_m = I_{pl} - h^3 t_w / 24. \quad (17)$$

Moment of inertia I_m represents mean value between moment of inertia I_{pl} of beam with plane web and I_0 is moment of inertia for cross section with opening (9).

Under classic perforation with hexagonal openings coefficient of rigidity K_c according to calculations by FEM can be adopted in form:

$$K_c = G t_w / (26.3(1.96\beta - 1)\beta H). \quad (18)$$

Substitution (18) in (12) lead to deflection of beam with hexagonal openings in form:

$$w_{hex}^{TCB} = w^{TT} (1 + 337(1.96\beta - 1)\beta H A / t_w l^2). \quad (19)$$

Expression (19) is applicable to beams in diapason of relative depth of openings $0.667 \leq \beta \leq 0.73$ under fixed relative width of web-posts $\xi = 1$. Moment of inertia in expression (19) is calculating according to relation (17).

For beams with sinusoidal openings (Fig. 3, *a*), which appeared not long ago in structural practice with aim to reduce the stress concentration we use denominations $l - H - t_w - b_f - t_f - \beta - \rho - \xi - \vartheta$, where magnitude ρ , representing a relative fillet radius, is determining as $\rho = r/a$ (r is radius fillet of angles of openings, a is inclined side of opening without fillet). In this paper it was considered variants of sinusoidal perforation (Fig. 3, *a*) with magnitude $\xi = 1$ and relative radiuses of fillet $\rho = 0.25$ (Fig. 4, *b*) and $\rho = 0.5$ (Fig. 4, *c*). Magnitude of angle of inclination of sides was $\vartheta = 60^\circ$.

For beams with sinusoidal openings (Fig. 3, *a*), i.e. with hexagonal openings with fillets, relation (16) is need

in correction, which is possible to make introducing additional function $k(\rho)$. In this case relation (16) takes form:

$$w_{\sin} = w^{TT}(1 + 104k(\rho)\beta HA/t_w l^2). \quad (20)$$

Determine $k(\rho)$ with help of calculations by FEM of the shear deformation of fragments of beams with length equal to step of openings (Fig. 4), with different radius of fillet under action the same shear force. Numerical calculations were performed with complex ANSYS using finite elements Shell63.

As it is clear from Fig. 4, *b*, under relative radius of fillet $\rho = 0.25$ the shear deformation of fragment is reducing at 1.048 times compare with fragment without of fillet (Fig. 4, *a*). Similar calculation under radius $\rho = 0.5$ (Fig. 4, *c*) lead to effect at 1.1 times. From obtained results it is possible to conclude that function $k(\rho)$, can be approximated by relation:

$$k(\rho) = 1.07 - 0.03\rho. \quad (21)$$

Some increasing of rigidity of beam under rounded angles can be explained with redistributing of material more near to shelves under common conservation of its volume.

Taking into account (21) the relation (20) for deflection of beam with sinusoidal perforation can be represented as:

$$w_{\sin}^{TCB} = w^{TT} \left(1 + 104(1.07 - 0.03\rho)\beta HA/t_w l^2 \right). \quad (22)$$

It is necessary to mark that obtained relation is reliable to case of perforation of web with openings of

regular hexagonal shape, having radius of fillets in diapason $0.25 \leq \rho \leq 0.5$.

Beams with circular openings (Fig. 3, *b*) is denoted as $l - H - t_w - b_f - t_f - \beta - \xi$, where $\xi = c/d$ (c is width of web-post, d is diameter of opening).

For castellated beams with circular openings it is using the same relation (12), and view of perforation taking into account only with coefficient of elastic lay K_c . For circular openings coefficient K_c can be approximated as:

$$K_c = Gt_w / \omega(\xi)\beta H, \quad (23)$$

where $\omega(\xi)$ is function, depending on relative width of web-post ξ .

For beams with circular openings function $\omega(\xi)$ was obtained on base of analysis of FEM calculations in form:

$$\omega(\xi) = 69\xi^2 - 73.5\xi + 26.7. \quad (24)$$

After substitution (23) in (12) we get expression for deflections of beams with circular openings in form:

$$w_{cir}^{TCB} = w^{TT} \left(1 + 12.8\beta HA\omega(\xi)/t_w l^2 \right). \quad (25)$$

For verification of obtained expressions (16), (19), (22) and (25) it is need to compare results with FEM.

Calculation of beams by FEM

After obtaining of analytical relations for deflections of castellated beams with various shape of openings (16), (19), (22) and (25) it will be considered application of them by comparison with solutions obtained by FEM and experimental data.

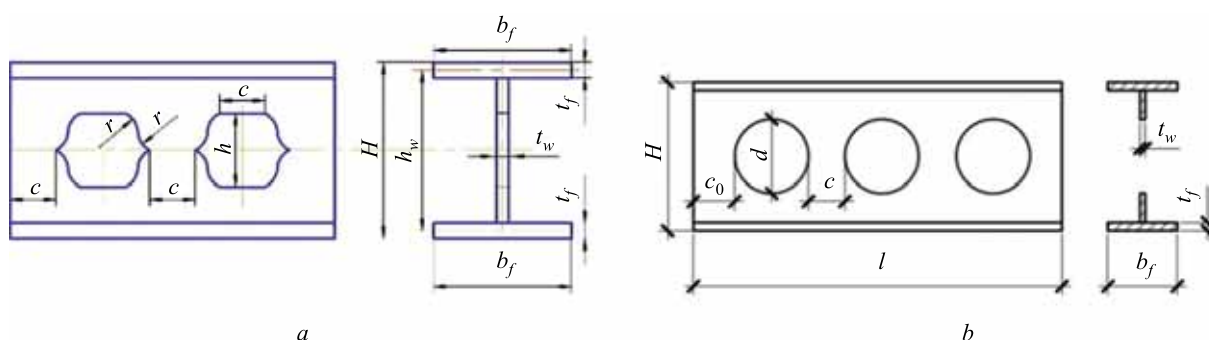


Fig. 3. Denominations for beams: *a* — with sinusoidal openings; *b* — with circular openings

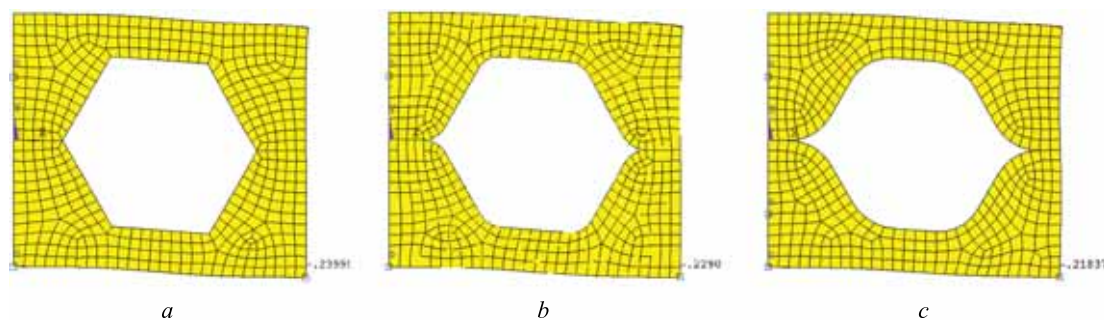


Fig. 4. Deformation of fragments of beams under: *a* — $\rho = 0$; *b* — $\rho = 0.25$; *c* — $\rho = 0.5$

Having relation (16) for estimation of deflection of castellated beams with diamond shaping openings it was performed calculations by FEM of these beams and then verified application of formula (16) for evaluation of deflections according to theory of composite bars.

The series of calculations of castellated beams with different parameters of openings were carried out. Deflections of simply supported beams $l = 75 - t_w - 17 - 1.52 \text{ cm} - \xi - \beta - 60^\circ$ under action of uniformly distributed load $q = 10 \text{ kN/m}$ with different relative width of web-posts $\xi = 0.2$, $\xi = 0.4$ and $\xi = 0.8$, different length of beams, different thickness and relative depth of openings were considered. Represented at Fig. 5 results show, that under constant depth of openings the influence of width of web-posts ξ on magnitude of deflection

practically is absent. This is reflecting in relation (16). It can be explained that fixed angle of inclination of sides of area of openings remains unchangeable under any parameter ξ , and with the same distribution of material of beam along its depth. Under relative length of beam $l/H = 14$, thickness of web $t_w = 0.6 \text{ cm}$, relative depth of openings $\beta = 0.73$ and $\xi = 0.2$ divergence in magnitudes of deflections, calculated by FEM and on relation (16), does not exceed $\delta = 0.9 \%$ (Fig. 5, *a*), and under $\xi = 0.4$ practically coincide (Fig. 5, *b*).

As most essential influence of shear on deflections is appearing in short beams (see relation (1)), it were calculated beams with $l/H = 10$, $\xi = 0.2$ and $\beta = 0.667$ (Fig. 6, *a*) and beams with $l/H = 10.17$, $\xi = 0.4$ and $\beta = 0.73$ (Fig. 6, *b*). In this case a divergence of results

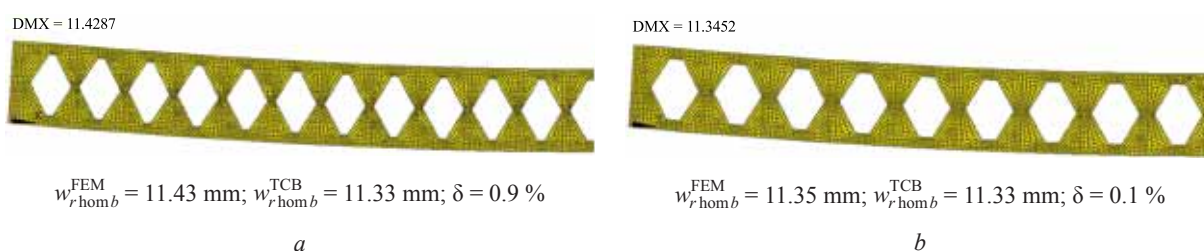


Fig. 5. Deflections of simply supported beams $l = 75 - t_w - 17 - 1.52 \text{ cm} - \beta - \xi - 60^\circ$ with various perforation: *a* — $\xi = 0.2$; *b* — $\xi = 0.4$

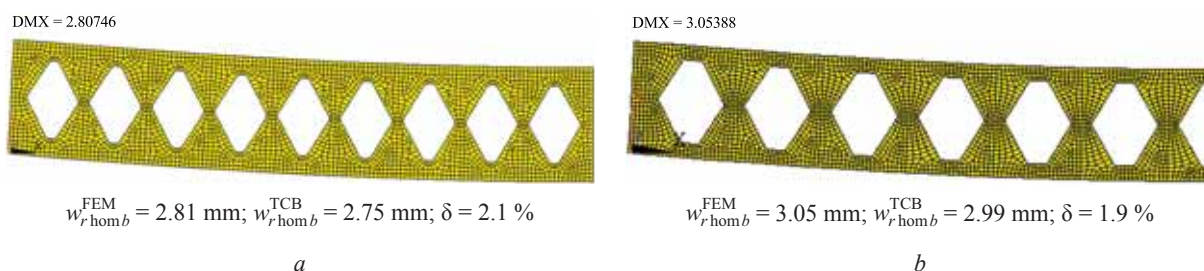


Fig. 6. Deflections of simply supported beams $l = 75 - t_w - 17 - 1.52 \text{ cm} - \beta - \xi - 60^\circ$ with different perforation: *a* — $l = 750 \text{ cm}$, $\beta = 0.667$, $\xi = 0.2$; *b* — $l = 763 \text{ cm}$, $\beta = 0.73$, $\xi = 0.4$

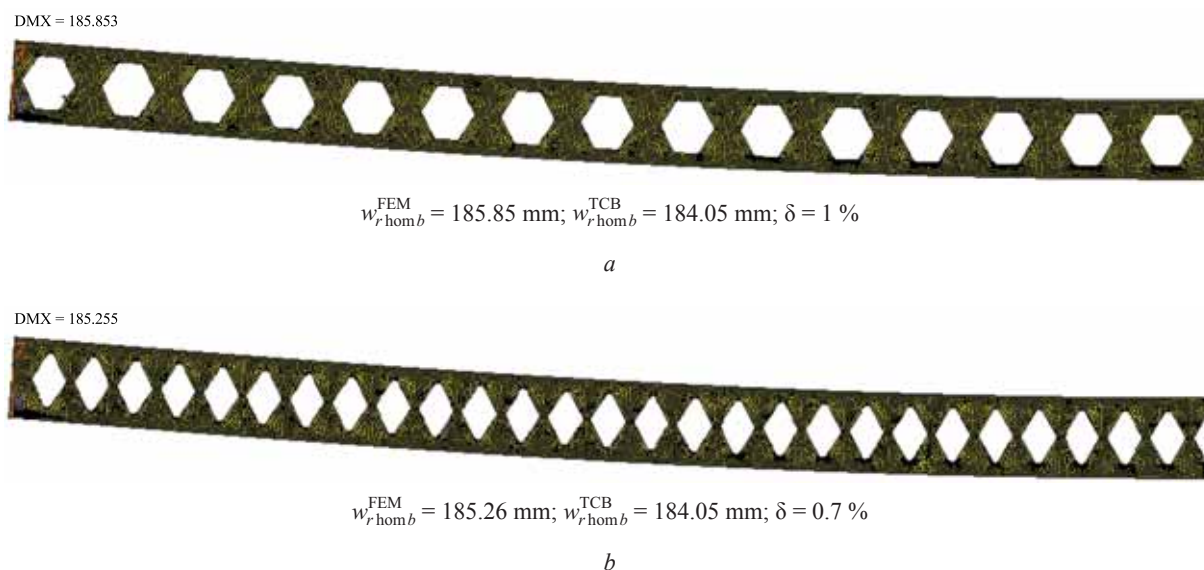


Fig. 7. Deflections of simply supported beams $2,700 - 90 - 1.2 - 19 - 1.78 \text{ cm} - \beta - \xi - 60^\circ$ at: *a* — $\xi = 0.8$; *b* — $\xi = 0.2$

obtained by FEM and on (16) is increasing, but not exceeds $\delta = 2.1\%$. In Fig. 6, b relative length was adopted equal to $l/H = 10.17$, as under less length it is not located a whole number of openings.

Under increasing of relative length to $l/H = 30$ it was performed calculations of beams $2,700 - 90 - 1.2 - 19 - 1.78$ cm – $0.667 - \xi - 60^\circ$ with relative width of web-posts $\xi = 0.8$ (Fig. 7, a) and $\xi = 0.2$ (Fig. 7, b). On the same Fig. 7 it is indicated results of calculation on (16), showing, that divergence with FEM does not exceed $\delta = 1\%$.

Existence of diamond shaping perforation with the depth openings $0.667H$ under angle of inclination of sides $\vartheta = 60^\circ$ independently of width of web-posts lead to reducing of flexible rigidity of beam approximately at 20–22 % compare with beam of the same dimensions without openings.

Increasing of relative depth of openings from $\beta = 0.667$ until $\beta = 0.73$ under $\vartheta = 60^\circ$ reduce the flexible rigidity approximately at 2–6 %.

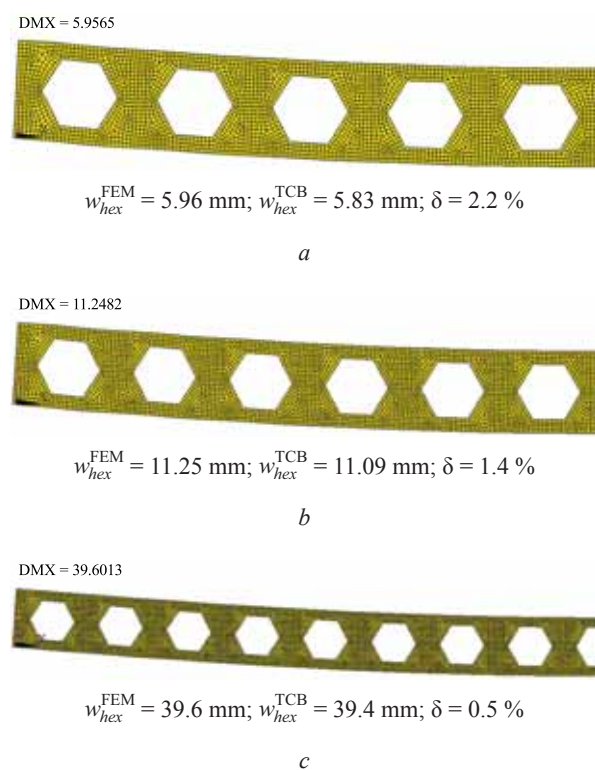


Fig. 8. Deflections of simply supported beams with hexagonal openings of regular shape $l - 75 - 0.6 - 17 - 1.52$ cm – $0.667 - 1 - 60^\circ$ at: $a - l = 875$ cm; $b - l = 1,050$ cm; $c - l = 1,480$ cm

For beams with hexagonal openings of regular shape it is possible to adopt relation (19), but calculations by FEM show (Fig. 8, a), that under $\xi = 1$ deflections, calculated by it lead to results with error not exceeding $\delta = 2.2\%$, only for openings with $\beta = 0.667$ under $l/H \geq 11.7$. Under $l/H = 14$ (Fig. 8, b) and $l/H = 19.7$ (Fig. 8, c) divergence with FEM is reducing to values $\delta = 1.4\%$ and $\delta = 0.5\%$ respectively.

For beams with bigger relative depth of openings calculations according to (19) and results by FEM (Fig. 9, $a-c$) show, that in diapason of length $11.7 \leq l/H \leq 19.7$ under $\beta = 0.73$ divergence with FEM does not exceed $\delta = 0.6\%$.

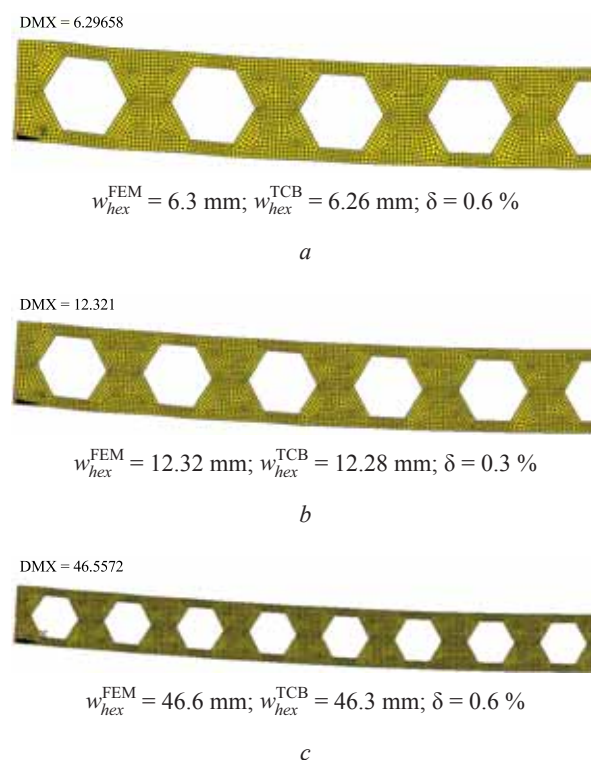


Fig. 9. Deflections of simply supported beams with hexagonal openings of regular shape $l - 75 - 0.6 - 17 - 1.52$ cm – $0.73 - 1 - 60^\circ$ at: $a - l = 860$ cm; $b - l = 1,050$ cm; $c - l = 1,520$ cm

Series of calculations of deflections of simply supported castellated beams with sinusoidal openings were performed with different parameters $l - 75 - 0.9 - 19.9 - 1.4$ cm – $0.667 - \rho - 1 - 60^\circ$ under uniformly distributed load $q = 10$ kN/m. It was changing magnitudes of relative radiuses of fillet in diapason $0.25 \leq \rho \leq 0.5$ and length of beam under fixed relative depth of openings $\beta = 0.667$ and relative width of web-posts $\xi = 1$. Results of calculations of indicated beams are shown in Fig. 10.

As show finite element analysis, the biggest divergence ($\delta = 0.9\%$) of FEM results and calculations on (22) can be seen for relatively short beams with $l/H = 11.57$ (Fig. 10, a). Increasing of relative length until $l/H = 13.88$ reduce error of calculation on (22) to $\delta = 0.3\%$ (Fig. 10, b), and at $l/H = 16.2$ error does not exceed 0.1% (Fig. 10, d). Calculation of beams with length $l/H = 13.88$ with relative radius of fillet $\rho = 0.25$ lead to error of calculation on (22) equal to $\delta = 0.9\%$ (Fig. 10, c).

For beams of big length with $l/H = 32.4$ divergence of analytical calculation with the FEM results is practically absent (Fig. 10, e). On the whole, calculations on (22) give rather good results, not exceeding divergence $\delta = 0.9\%$ in diapason of relative lengths $11.57 \leq l/H \leq 32.4$.

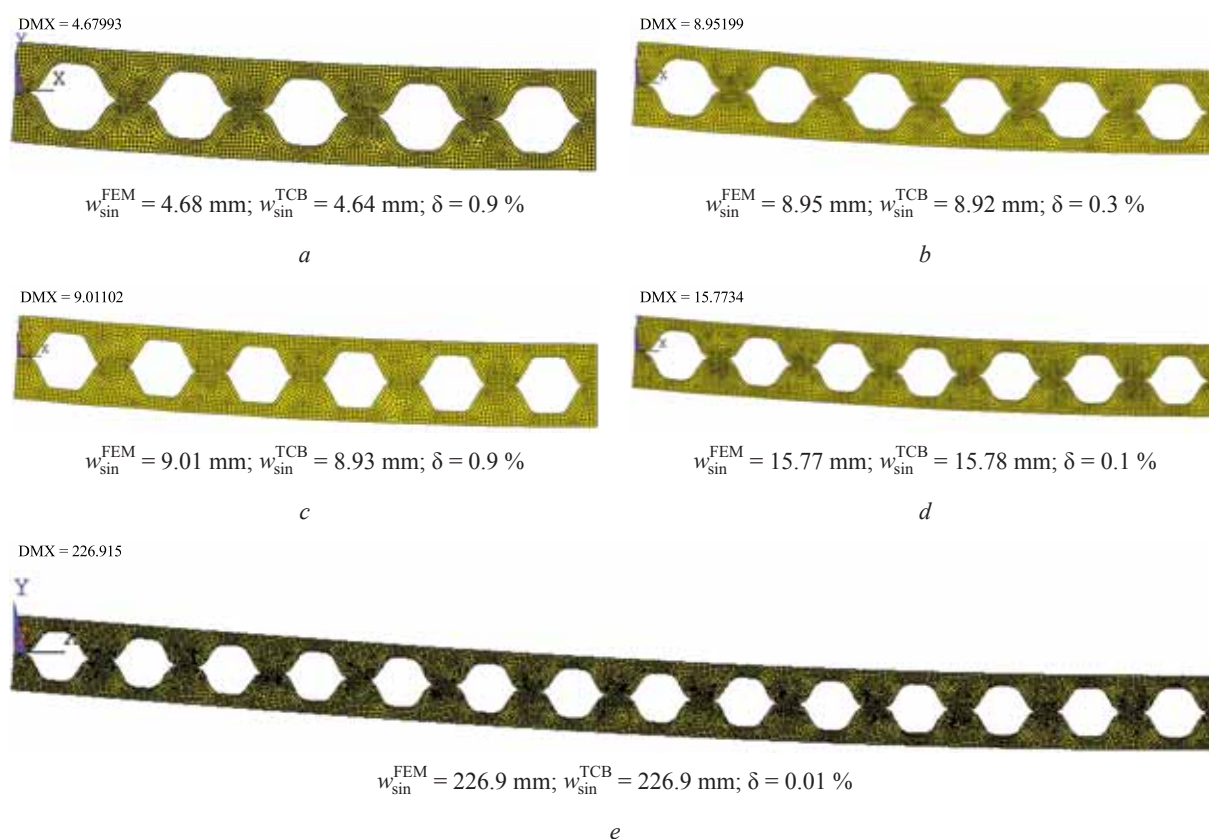


Fig. 10. Deflections of simply supported beams $l - 75 - 0.9 - 19.9 - 1.4 \text{ cm} - 0.667 - \rho - 1 - 60^\circ$ under uniformly distributed load $q = 10 \text{ kN/m}$: *a* — $l/H = 11.57$, $\rho = 0.5$; *b* — $l/H = 13.88$, $\rho = 0.5$; *c* — $l/H = 13.88$, $\rho = 0.25$; *d* — $l/H = 16.2$, $\rho = 0.5$; *e* — $l/H = 32.4$, $\rho = 0.5$

It can be noted from relation (22) that radius of fillet has very small influence on deflections of beams with sinusoidal openings.

Constructive design of beams with circular openings have a big difference: it is using beams with relative width of web-posts $\xi = 0.15$ (Fig. 11, *a*), with $\xi = 0.25$ (Fig. 11, *b*) and with $\xi = 0.5$ (Fig. 1, *d*). Relative depth of openings is changing in diapason $0.667 \leq \beta \leq 0.73$. That is why in such wide diapason it will be performed calculations of castellated beams with circular openings by FEM.

Deflections of castellated beams with circular openings were calculated by FEM for beams with

dimensions $1,050 - 75 - 1 - 17 - 1.52 \text{ cm} - 0.667 - \xi$ and $0.15 \leq \xi \leq 0.5$. Relative length of beams was equal to $l/H = 14$. Results of calculation by FEM using ANSYS under relative width of web-posts $\xi = 0.15$ and on (25) are shown in Fig. 12, *a*, from which it is clear that divergence with indicated values does not exceed $\delta = 0.1 \%$. Approximately the same accuracy demonstrate calculations with variant of the web-post width $\xi = 0.4$ (Fig. 12, *b*) and variant with $\xi = 0.5$ (Fig. 12, *c*). In Fig. 12, *d* is shown deflection of beam with solid web, which allow to appreciate influence of openings at changing of rigidity of beam. As it possible to see from comparison of Fig. 12, *a* and Fig. 12, *d*, existence of



Fig. 11. Constructive design of beams with circular openings: *a* — $\xi = 0.15$; *b* — $\xi = 0.25$

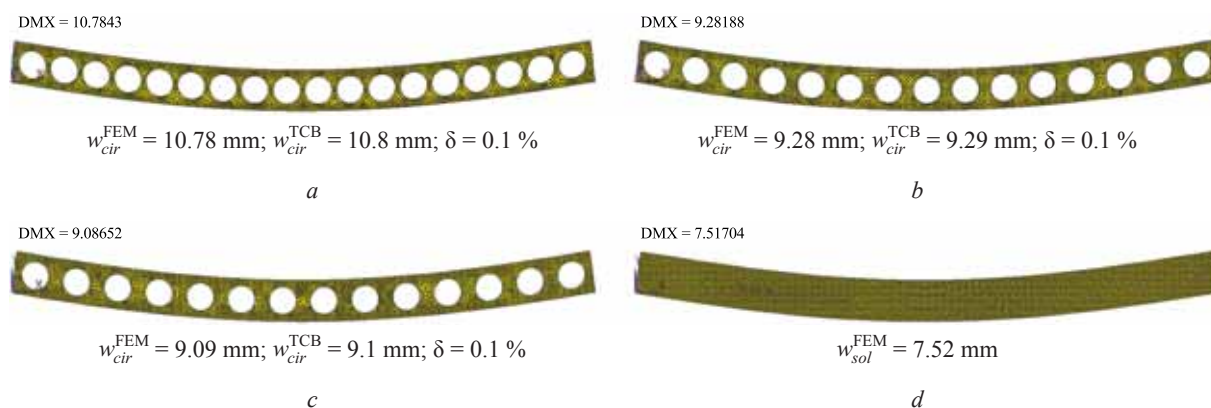


Fig. 12. Deflections of simply supported beam 1,050 – 75 – 1 – 17 – 1.52 cm – 0.667 – ξ under distributed load $q = 10$ kN/m: a — $\xi = 0.15$; b — $\xi = 0.4$; c — $\xi = 0.5$; d — solid beam

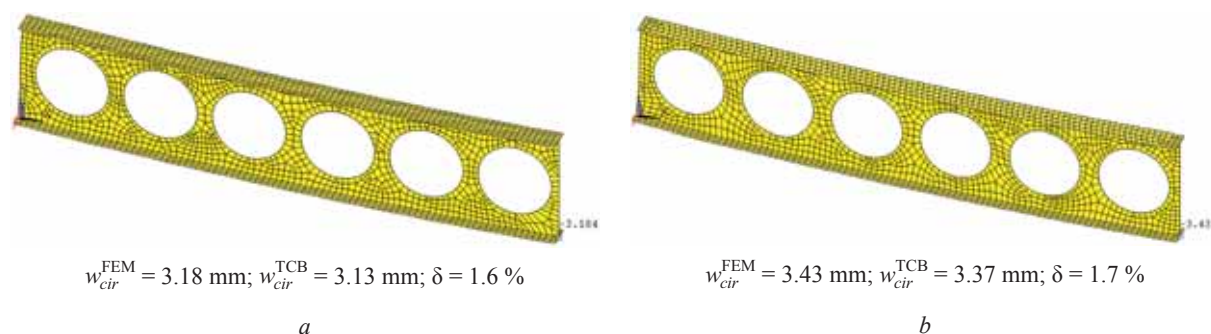


Fig. 13. Deflections of simply supported beam l – 75 – 0.95 – 17 – 1.52 cm – 0.667 – ξ : a — $l = 730$ cm, $\xi = 0.2$; b — $l = 760$ cm, $\xi = 0.25$

perforation with $\xi = 0.15$ and $\beta = 0.667$ lead to increasing of deflection of simply supported beam of indicated dimensions approximately at 1.44 times.

Data of calculation of beams with $l/H = 14$, shown in Fig. 12, obtained by FEM and on (25), allow to mark high accuracy of indicated relation for beams with any kind of perforation.

So far as the most strong effect of shear is appearing in short beams, the calculations were made for beams

with $l/H = 9.73$ (Fig. 13, a), which show that at $\xi = 0.2$ error is not exceed $\delta = 1.6$ % (Fig. 13, a), and at $\xi = 0.25$ divergence with FEM is increasing till $\delta = 1.7$ % (Fig. 13, b).

Increasing of related length of beam till $l/H = 30$ lead to deflections, shown in Fig. 14 under $\xi = 0.4$ (Fig. 14, a) and $\xi = 0.15$ (Fig. 14, b). Calculations on (25) show that divergence with results by FEM does not exceed 0.5 %.

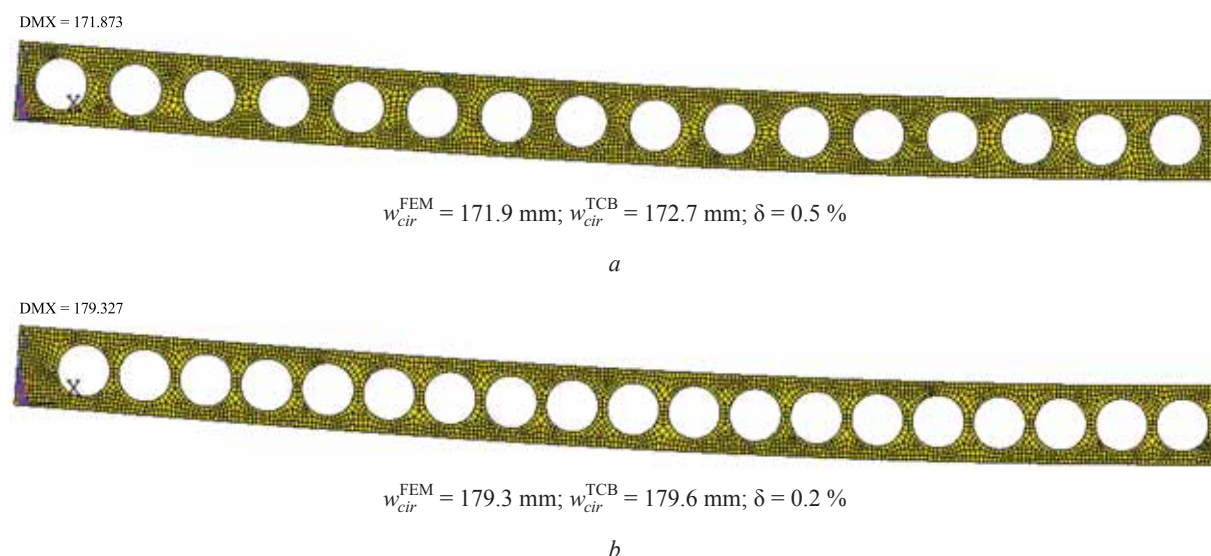


Fig. 14. Deflections of simply supported beam 2,250 – 75 – 1 – 17 – 1.52 cm – 0.667 – ξ : a — $\xi = 0.4$; b — $\xi = 0.15$

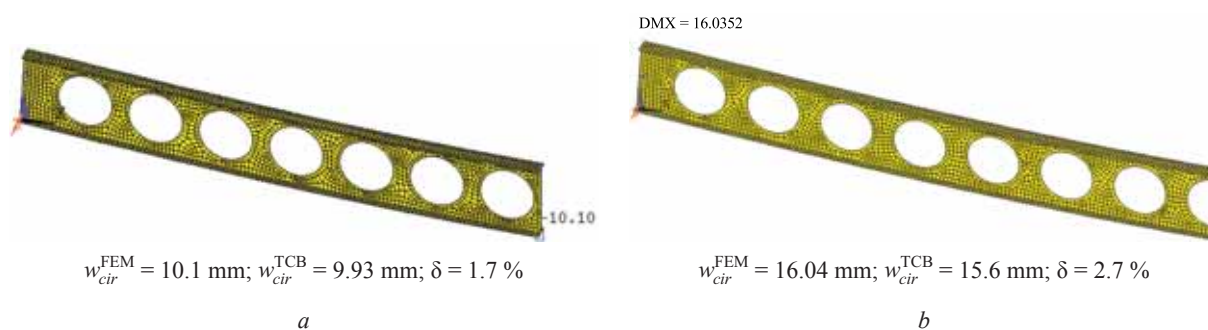


Fig. 15. Deflections of simply supported beam $l = 75 - 1 - 17 - 1.52 \text{ cm} - 0.73 - \xi$; $a — l = 1,050 \text{ cm}, \xi = 0.3$; $b — l = 1,200 \text{ cm}, \xi = 0.4$

Calculations performed for beams $1,050 - 75 - 1 - 17 - 1.52 \text{ cm} - 0.73 - \xi$ with relative depth of openings $\beta = 0.73$, show that for beams with relative width of web-posts $\xi = 0.3$ divergence in results by FEM and on (25) is less than 1.7 % (Fig. 15, *a*). But for similar beam with $l = 1,200 \text{ cm}$ and $\xi = 0.4$ calculations lead to increasing of error up to 2.7 % (Fig. 15, *b*).

Experimental study of deflections

Material of models was steel C345 with elastic constants $E = 210 \text{ GPa}$ and $\mu = 0.3$. Scheme of testing set is shown in Fig. 16, *a*, represented by itself two columns located at distance one meter from each other at which was put down the testing four meters' model. Model have two console with length 1.5 m each. To ends of beam were applied concentrated forces $F = 5 \text{ kN}$ via dynamometers for traction, jointed to power floor via bottle rigging screw. Deflections with accuracy 0.01 mm were measured with indicators of watch type located at edges of beam (Fig. 16, *a*). It was tested three beams $400 - 28 - 0.2 - 10 - 0.3 \text{ cm} - 0.667 - \xi - 60^\circ$ with relative width of web-posts $\xi = 0.4$, $\xi = 0.6$ and $\xi = 1$. Values of the measured deflections were equal to $w_{0.4}^{test} = 4.68 \text{ mm}$ under $\xi = 0.4$; $w_{0.6}^{test} = 4.72 \text{ mm}$ under $\xi = 0.6$ and $w_1^{test} = 4.80 \text{ mm}$ under $\xi = 1$. Tested beam with $\xi = 0.4$ is shown at Fig. 16, *b*.

Calculations by FEM give results $w_{0.4}^{FEM} = 4.6 \text{ mm}$ (Fig. 17, *a*), $w_{0.6}^{FEM} = 4.62 \text{ mm}$ (Fig. 17, *b*) and $w_1^{FEM} = 4.76 \text{ mm}$ (Fig. 17, *c*) respectively.

For calculations of deflections of double consoled castellated beam on (16) it is necessary initially determine magnitude w^{TT} . In accordance with character of loading deflection w^{TT} is determining as:

$$w^{TT} = \frac{Pl^3}{6EI_m} \frac{a}{l} \left(3 \frac{ab}{l^2} - \frac{a^2}{l^2} \right), \quad (26)$$

where I_m is moment inertia of cross section of beam, determined on (17); $a = 1.5 \text{ m}$ is length of console; $b = l - a = 2.5 \text{ m}$ is distance from first support to end of beam.

This lead to value $w^{TT} = 3.72 \text{ mm}$, substitution of which in (16) gives:

$$w_{rhom b}^{TCB} = 3.72 \frac{1 + 104 \cdot 186.8 \cdot 387}{2 \cdot 4,000^2} = 4.59 \text{ mm}. \quad (27)$$

Divergence between (27) and experiment for beam with $\xi = 0.6$ is 2.8 %.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Compare results, obtained with different methods for evaluation of their accuracy. As criteria of reliability we will be use results of the FEM calculation. It is need to mark that in all considered below formulas authors of studies [8, 16] there were considered castellated simply supported beams with hexagonal openings with relative depth equal to $\beta = 0.667$, and loaded with uniformly distributed load q .



Fig. 16. Testing set up for determination of beam's deflections: $a —$ with wide web-posts $\xi = 1$; $b —$ with narrow web-posts $\xi = 0.4$

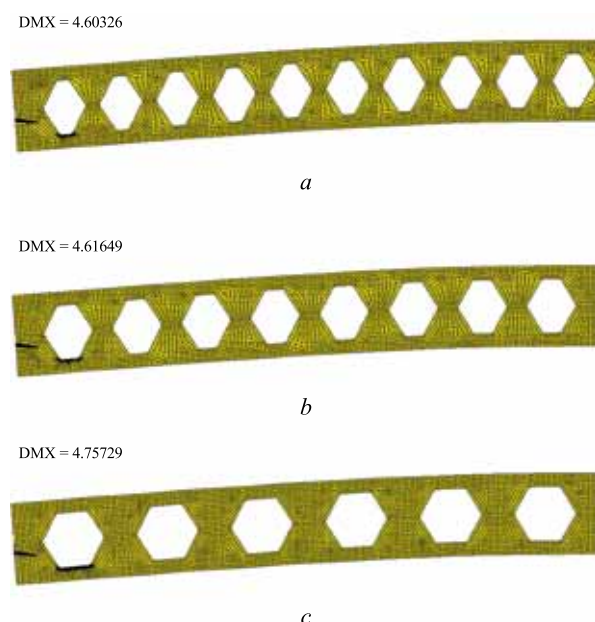


Fig. 17. Deflections of double cantilevered beams 400 – 28 – 0.2 – 10 – 0.3 cm – 0.667 – ξ – 60° with different width of web-posts: *a* — $\xi = 0.4$; *b* — $\xi = 0.6$; *c* — $\xi = 1$

In study [8] relation for deflections of castellated beam with hexagonal openings, based on Vierendeel scheme was obtained in form:

$$w_{hex}^V = \frac{5ql^4}{384EI_{eff}} + k \sum_{i=1}^n \frac{V_i l}{GA_{eff}}, \quad (28)$$

where q is distributed load; l is length of beam; E and G are Young's modulus and shear modulus respectively; I_{eff} and A_{eff} are effective moment of inertia of castellated beam and effective area of shear of T-section respectively; k is numerical factor; n is number of openings in beam; V_i are ordinates from diagram of transverse forces, corresponding to centers of openings.

Values I_{eff} and GA_{eff} in [8] were determined as:

$$I_{eff} = \frac{t_w H^3}{12} + \frac{b_f t_f H^2}{2} - \frac{t_w (\beta H)^3}{24}, \quad (29)$$

$$GA_{eff} = \frac{3EI_t s}{c^3},$$

where I_t is moment of inertia of T-section above opening; s is step of openings; $c = 3s/8$ is calculated length of T-section.

Represented in [8] relation (28) is a few incorrect from our point of view, but after some improvement performed by us, this relation including (29) can be modified into:

$$w_{cas}^V = w^{TT} \left(1 + 4.86 \frac{I_{eff} s^2}{I_t l^2} \right). \quad (30)$$

In study [16] based on the principle of minimum potential energy the deflections of castellated beams with

hexagonal openings is proposed to calculate according to relation:

$$w_{cas}^E = \frac{5ql^4}{384E(2I_t + 2v^2A)} + \frac{ql^2a}{16GK_c t_w} \times \left(\frac{vA}{I_t + v^2A} \right)^2 \left(1 - \frac{2EI_t a}{GK_c t_w l^2 v^2} \right), \quad (31)$$

where I_t is moment of inertia of T-section, calculated according to (9); $2v$ is distance between centers of gravity of T-sections located above and below opening; A is area of T-section, calculated on (13); $2a$ is depth of openings; $K_c = 0.19 - 0.25b_f/l$.

After simple transformation performed by us relation (31) can be written as:

$$w_{cas}^E = w^{TT} \left(1 + \frac{49.92av^2A^2}{K_c t_w l^2 I} \left(1 - \frac{5.2I_t a}{K_c t_w l^2 v^2} \right) \right), \quad (32)$$

where $I = 2I_t + 2v^2A$ is moment of inertia for cross section with opening.

Incoming into relation (32) magnitudes are calculated as:

$$A = t_f b_f + t_w \frac{a}{2 - t_f},$$

$$I = b_f t_f \frac{(H - t_f)^2}{2} + t_w \frac{(H - 2t_f)^3}{12} - t_w \frac{(2a)^3}{12},$$

$$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f z_c^2 + t_w \frac{(a/2 - t_f)^3}{12} + t_w \frac{a}{2 - t_f} \left(\frac{a}{4 - z_c} \right)^2,$$

$$z_c = (0.5a - t_f) t_w \frac{(0.5a - t_f) 0.5 + 0.5t_f}{b_f t_f + (0.5a - t_f) t_w},$$

$$v = \frac{H - t_f}{2} - z_c, \quad a = H/3.$$

According to represented relations (30), (32) and (16), it can be calculated deflections of castellated beams, which are shown in Fig. 18. Beams of constant cross section but different length $l = 60 - 0.86 - 18 - 1.35$ cm – 0.667 – 1 were calculated.

Results of calculations shown in Fig. 18 are collected in Table 1. In this Table 1 in corresponding columns are indicated divergences of calculation of deflections in respect to FEM data.

One more series of calculations was performed on beam of other dimensions (Fig. 19), in order to be sure in stability of obtained results. Data of these calculations are collected in Table 2.

As it can be seen from represented in Table 1 and Table 2 data the best results demonstrate relations (16) and (30) but relation (16) is more attractive because do

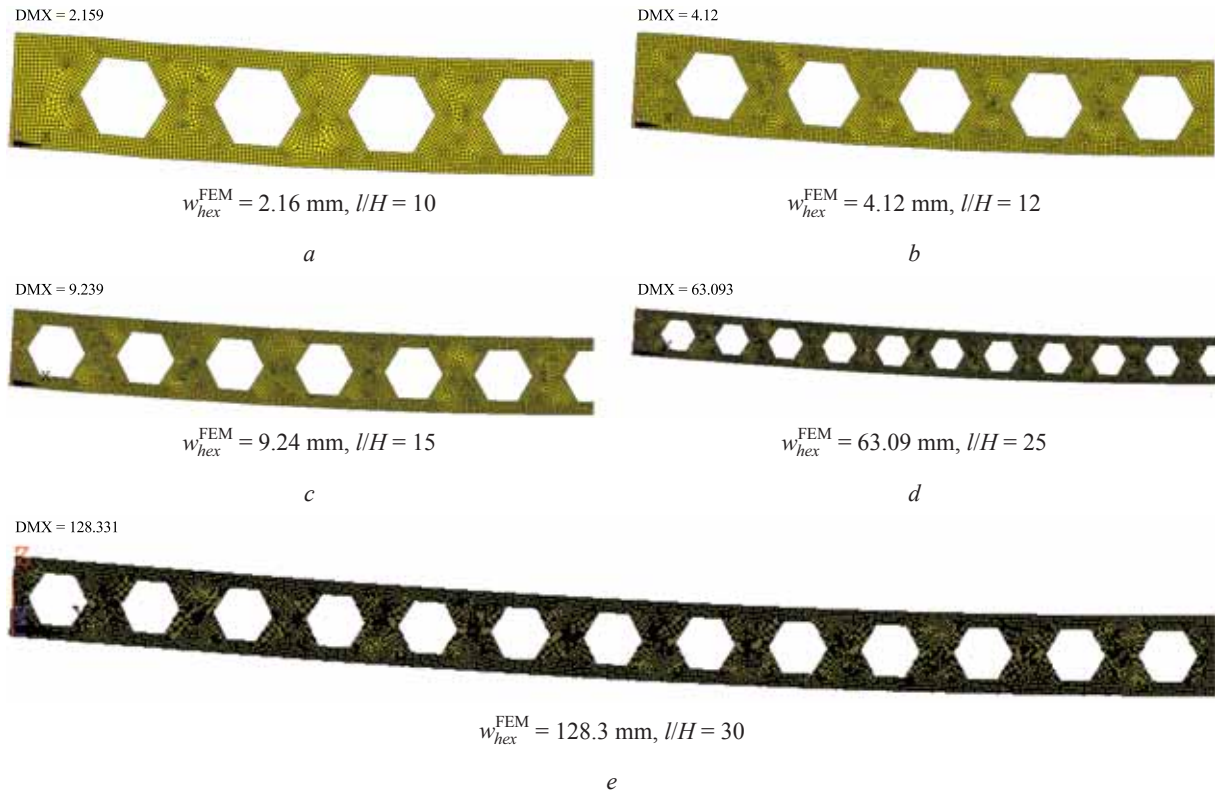


Fig. 18. Deflections of castellated beams $l - 60 - 0.86 - 18 - 1.35 \text{ cm} - 0.667 - 1$ under distributed load $q = 10 \text{ kN/m}$: $a - l = 6 \text{ m}$; $b - l = 7.2 \text{ m}$; $c - l = 9 \text{ m}$; $d - l = 15 \text{ m}$; $e - l = 18 \text{ m}$

Table 1. Deflections of castellated beams $l - 60 - 0.86 - 18 - 1.35 \text{ cm} - 0.667 - 1$ of different length

Method of calculation	$l/H = 10$		$l/H = 12$		$l/H = 15$		$l/H = 25$		$l/H = 30$	
$w_{hex}^{FEM}, \text{ mm}$	2.16	–	4.12	–	9.24	–	63.09	–	128.3	–
$w_{hex}^V, \text{ mm}$	2.14	0.9 %	4.04	1.9 %	9.07	1.8 %	63.11	0.01 %	128.4	0.1 %
$w_{hex}^E, \text{ mm}$	2.02	6.5 %	3.91	5.1 %	9.00	2.6 %	64.62	2.4 %	132.3	3.1 %
$w_{hex}^{TCB}, \text{ mm}$	2.16	0 %	4.08	1 %	9.13	1.2 %	63.29	0.3 %	128.7	0.3 %

Table 2. Deflections of castellated beams $l - 38 - 0.6 - 12 - 1 \text{ cm} - 0.667 - 1$ of different length

Method of calculation	$w_{hex}^{FEM}, \text{ mm}$		$w_{hex}^V, \text{ mm}$		$w_{hex}^E, \text{ mm}$		$w_{hex}^{TCB}, \text{ mm}$	
Beam-1	2.24	–	2.12	5.4 %	2.07	7.6 %	2.22	0.9 %
Beam-2	27.14	–	27.28	0.5 %	26.65	1.8 %	27.66	1.9 %

not require calculations of center of gravity and moment of inertia of T-section. At the same time relation (16) allow to change depth of openings, but relations (28) and (30) are applicable only for hexagonal openings with related depth $\beta = 0.667$. Relation (32) is less accurate than two others.

Obtained with the theory of composite bars analytical dependence (12) for deflections of simply supported beams is applicable for beams with various type of perforation and different kind of loading. Type

of perforation is determined with coefficient of rigidity of elastic lay K_c and kind of loading is determining with magnitude w^{TT} .

For beams with diamond shaping openings dependence (16) is applicable in diapason of relative depth of openings $0.667 \leq \beta \leq 0.73$ at relative length of beams $l/H \geq 10$. Relative width of web-posts in diapason $0.2 \leq \xi \leq 0.8$ practically does not influent on deflections. Calculations of deflections on (16) have a good correlation as with results obtained by FEM so and with experiments.

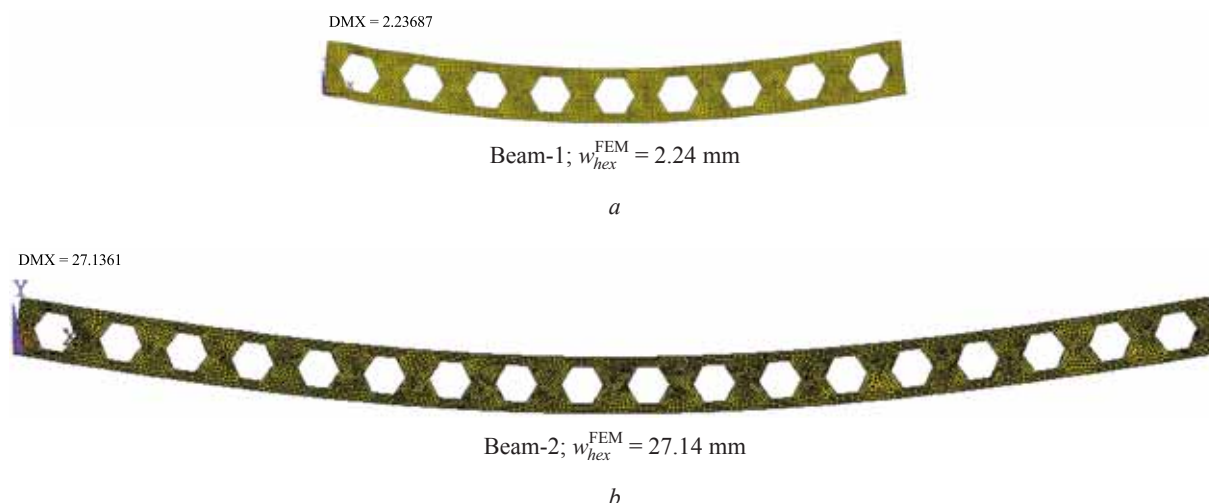


Fig. 19. Deflection of beams $l = 38 - 0.6 - 12 - 1 \text{ cm} - 0.667 - 1$ under $q = 10 \text{ kN/m}$: $a - l = 4 \text{ m}$; $b - l = 8 \text{ m}$

For beams with hexagonal openings of regular shape, i.e. with $\xi = 1$, relation (19) brings to error not exceeding 2.2 % under $l/H \geq 11.7$.

Sinusoidal perforation according to relation (22) increase rigidity of castellated beam compare to beam with regular form of hexagonal openings without fillets only at 2–2.5 %.

For beams with circular openings dependence (25) is applicable in diapason $0.667 \leq \beta \leq 0.73$ and $0.15 \leq \xi \leq 0.5$ under relative length of beam $l/H \geq 10$.

Calculations of deflections according to obtained above formulas are in a good correlation with FEM results.

Comparative analysis show that relations (16) and (30) demonstrates good results almost coinciding with results obtained by FEM but relation (16) is more attractive as no demands calculations of center of gravity and moment of inertia of T-section. Formula (31) is less accurate than two others.

REFERENCES

1. Gibson J.E., Jenkins B.S. An investigation of the stresses and deflections in castellated beams. *Structural Engineer*. 1957; 12:464-479.
2. Altfillisch M.D., Cooke B.R., Toprac A.A. An investigation of welded open-web expanded beams. *Welding Research Supplement*. 1957; 22:77-88.
3. Gardner N.J. An investigation into the deflection behavior of castellated beams. *Transactions of the Engineering institute of Canada*. 1969; 9(7):56-64.
4. Hosain M.U., Speirs W.G. Experiments on castellated steel beams. *Supplement to the Welding Journal*. 1973; 8:329-342.
5. Hosain M.U., Cheng W.K., Neis V.V. Deflection analysis of expanded open-web steel beams. *Computers & Structures*. 1974; 4(2):327-336. DOI: 10.1016/0045-7949(74)90061-3
6. Hrabok M.M., Hosain M.U. Castellated beams deflections using substructuring. *Journal of the structural Division Proceedings of the ASCE*. 1977; 103(1):265-269.
7. Chung K.F., Liu T.C.H., Ko A.C.H. Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web opening. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001; 57(5):467-490. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00035-3
8. Raftoyiannis I.G., Ioannidis G.I. Deflection of castellated I-beams under transverse loading. *International Journal of Steel Structures*. 2006; 6:31-36.
9. Chhapkane N.K., Sashikant R.K. Analysis of stress distribution in castellated beam using finite element method and experimental techniques. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications Research*. 2012; 03(03):190-197.
10. Wakchaure M.R., Sagade A.V. Finite element analysis of castellated steel beam. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012; 2(1):365-372.
11. Durif S., Bouchair A. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia Engineering*. 2012; 40:108-113. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.064
12. Durif S., Bouchair A., Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 82(1):72-87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.12.010
13. Kumbhar P.D., Jamadar F.M. Optimization of opening size for castellated beam with sinusoidal openings. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2015; 5(3):301-313.

14. Budi I., Sukamta S., Partono W. Optimization analysis of size and distance of hexagonal hole in castellated steel beams. *Procedia Engineering*. 2017; 171:1092-1099. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.465
15. Yuan W.-b., Yu N.-t., Bao Z.-s., Wu L.-p. Deflection of castellated beams subjected to uniformly distributed transverse loading. *International Journal of Steel Structures*. 2016; 16(3):813-821. DOI: 10.1007/s13296-015-0120-2
16. Elaiwi S., Kim B., Li L. Bending analysis of castellated beams. *Athens Journal of Technology & Engineering*. 2019; 6(1):212-226.
17. Jamadar F.M., Kumbhar P.D. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015; 2(2):715-722.
18. Rzchanizyn A.R. *Composite bars and plates*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 314. (rus.).
19. Endzhievsky L.V., Yurchenko A.A. Analysis of algorithms for determining the deflections of steel composite I-beams, taking into account shear deformations. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2002; 10:129-134. (rus.).
20. Kopytov M.M., Jashyn S.G. Peculiarities of work of perforated beams with increased degree of development of section. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2003; 3(531):4-8. (rus.).
21. Pritykin A.I. The castellated beams deflections calculated with the theory of composed bars. *Mechanika*. 2015; 21(5):367-371. DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.12181
22. Pritykin A.I. Deflections of perforated beams with hexagonal cutouts: two forms of solution. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 5:10-16. (rus.).
23. Pritykin A.I., Emelianov K.A. Determination of deflections of beams with rhombic perforation of the web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2018; 13(7):814-823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823
24. Pritykin A.I. Deflection of beams with sinusoidal perforation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 913: 392-398. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022062
25. Solovev A.V., Vasiukov I.A. Stiffness value analyses of perforated I-beams with circular web perforation. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 3: 36-38. (rus.).

Received July 27, 2022.

Adopted in revised form on August 1, 2022.

Approved for publication on August 30, 2022.

B I O N O T E S: **Alexej I. Pritykin** — Doctor of Technical Sciences, Associate professor, Professor of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering; **Kaliningrad State Technical University (KGTU)**; 1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, Russian Federation; **Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU)**; 14 A. Nevsky st., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; ID RISC: 414948, Scopus: 56800902800, ORCID: 0000-0002-6597-8558; prit_alex@mail.ru.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gibson J.E., Jenkins B.S. An investigation of the stresses and deflections in castellated beams // *Structural Engineer*. 1957. Vol. 12. Pp. 464–479.
2. Altfillisch M.D., Cooke B.R., Toprac A.A. An investigation of welded open-web expanded beams // *Welding Research Supplement*. 1957. Vol. 22. Pp. 77–88.
3. Gardner N.J. An investigation into the deflection behavior of castellated beams // *Transactions of the Engineering institute of Canada*. 1969. Vol. 9. Issue 7. Pp. 56–64.
4. Hosain M.U., Speirs W.G. Experiments on castellated steel beams // *Supplement to the Welding Journal*. 1973. Vol. 8. Pp. 329–342.
5. Hosain M.U., Cheng W.K., Neis V.V. Deflection analysis of expanded open-web steel beams // *Computers & Structures*. 1974. Vol. 4. Issue 2. Pp. 327–336. DOI: 10.1016/0045-7949(74)90061-3
6. Hrabok M.M., Hosain M.U. Castellated beams deflections using substructuring // *Journal of the structural Division Proceedings of the ASCE*. 1977. Vol. 103. Issue 1. Pp. 265–269.
7. Chung K.F., Liu T.C.H., Ko A.C.H. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web opening // *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57. Issue 5. Pp. 467–490. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00035-3
8. Raftoyiannis I.G., Ioannidis G.I. Deflection of castellated I-beams under transverse loading // *International Journal of Steel Structures*. 2006. Vol. 6. Pp. 31–36.
9. Chhapkhane N.K., Sashikant R.K. Analysis of stress distribution in castellated beam using finite element method and experimental techniques // *International Journal of Mechanical Engineering and Applications Research*. 2012. Vol. 03. Issue 03. Pp. 190–197.
10. Wakchaure M.R., Sagade A.V. Finite element analysis of castellated steel beam // *International Journal*

of Engineering and Innovative Technology. 2012. Vol. 2. Issue 1. Pp. 365–372.

11. Durif S., Bouchair A. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 108–113. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.064

12. Durif S., Bouchair A., Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 82. Issue 1. Pp. 72–87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.12.010

13. Kumbhar P.D., Jamadar F.M. Optimization of opening size for castellated beam with sinusoidal openings // *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2015. Vol. 5. Issue 3. Pp. 301–313.

14. Budi I., Sukamta S., Partono W. Optimization analysis of size and distance of hexagonal hole in castellated steel beams // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. Pp. 1092–1099. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.465

15. Yuan W.-b., Yu N.-T., Bao Z.-s., Wu L.-p. Deflection of castellated beams subjected to uniformly distributed transverse loading // *International Journal of Steel Structures*. 2016. Vol. 16. Issue 3. Pp. 813–821. DOI: 10.1007/s13296-015-0120-2

16. Elaiwi S., Kim B., Li L. Bending analysis of castellated beams // *Athens Journal of Technology & Engineering*. 2019. Vol. 6. Issue 1. Pp. 212–226.

17. Jamadar F.M., Kumbhar P.D. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 2. Issue 2. Pp. 715–722.

18. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М. : Стройиздат, 1986. 314 с.

19. Енджиевский Л.В., Юрченко А.А. Анализ алгоритмов определения прогибов стальных составных двутавровых балок с учетом деформаций сдвига // *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 10. С. 129–134.

20. Копытов М.М., Яшин С.Г. Особенности работы перфорированных балок с повышенной степенью развития сечения // *Известия вузов. Строительство*. 2003. № 3 (531). С. 4–8.

21. Притыкин А.И. Определение прогибов перфорированных балок с помощью теории составных стержней // *Механика*. 2015. № 21 (5). С. 367–371. DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.12181

22. Притыкин А.И. Прогибы перфорированных балок с шестиугольными вырезами: две формы решения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 5. С. 10–16.

23. Притыкин А.И., Емельянов К.А. Определение прогибов балок с ромбовидной перфорацией стенки // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 814–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823

24. Pritykin A.I. Deflection of beams with sinusoidal perforation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. Pp. 392–398. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022062

25. Соловьев А.В., Васюков И.А. Анализ жесткостных характеристик перфорированных балок с круглой перфорацией стенки // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 3. С. 36–38.

Поступила в редакцию 27 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 1 августа 2022 г.

Одобрена для публикации 30 августа 2022 г.

О Б АВТОРЕ: **Алексей Игоревич Притыкин** — доктор технических наук, профессор кафедры судостроения, судоремонта и морской техники; **Калининградский государственный технический университет (КГТУ)**; 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1; **Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта)**; 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14; РИНЦ ID: 414948, Scopus: 56800902800, ORCID: 0000-0002-6597-8558; prit_alex@mail.ru.

Применение квантово-химического моделирования для определения механизма электрической проводимости в силикатных матрицах

Григорий Иванович Яковлев¹, Николай Владимирович Хохряков²,
Ирина Сергеевна Полянских¹, Золтан Орбан³, Александр Николаевич Гуменюк¹

¹ *Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
(ИжГТУ имени М.Т. Калашникова); г. Ижевск, Россия;*

² *Ижевская государственная сельскохозяйственная академия (Ижевская ГСХА); г. Ижевск, Россия;*

³ *Печский университет; г. Печ, Венгрия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Модификация бетона суспензией технической сажи приводит к значительному повышению электрической проводимости композитных строительных материалов. Подобные материалы представляют большой интерес в таких отраслях строительного производства, как транспортное, энергетическое и промышленное строительство, и могут применяться в качестве системы активного снеготопления, защиты арматуры от электрохимической коррозии, защиты от электромагнитного излучения. Представлены результаты исследования возможного механизма возникновения электрической проводимости в силикатной матрице, модифицированной углеродными наночастицами.

Материалы и методы. С целью исследования контактных областей между углеродными наночастицами в силикатной матрице проводились расчеты малых молекулярных фрагментов, присутствующих в модифицированном бетоне. Расчеты выполнены методом функционала плотности в программе FireFly. Обменно-корреляционные эффекты учитывались с использованием функционала B3LYP.

Результаты. Оптимальное процентное содержание модифицирующего компонента определяет возможность образования сетки проводящих углеродных наночастиц в среде минерального вяжущего. Электрическое сопротивление материала обусловлено сопротивлением контактных областей между этими наночастицами. Проведены квантово-химические исследования молекулярных фрагментов, присутствующих в контактных областях, и взаимодействия между ними. Выполнена оценка влияния молекулярных фрагментов силикатной матрицы на электрическое сопротивление контактных областей.

Выводы. Квантово-химические расчеты и анализ на основе процентного содержания составляющих компонентов показали, что электрическая проводимость модифицированного бетона обеспечивается движением электронов по сетке углеродных наночастиц, формирующейся в силикатной матрице. Основной вклад в электрическое сопротивление материала вносят области контактов между этими наночастицами. Сопротивление снижается за счет присутствия в контактных областях молекулярных фрагментов силикатной матрицы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силикатные матрицы, квантово-химическое моделирование, графен, техническая сажа, электропроводность, минеральное вяжущее

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-53-26011.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Яковлев Г.И., Хохряков Н.В., Полянских И.С., Орбан З., Гуменюк А.Н. Применение квантово-химического моделирования для определения механизма электрической проводимости в силикатных матрицах // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1175–1186. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1175-1186

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Гуменюк, gumeniuk.an@gmail.com.

Applying the quantum chemical simulation to describe electrical conductivity in silicate-based materials

Grigoriy I. Yakovlev¹, Nikolaj V. Khokhriakov², Irina S. Polyanskikh¹, Zoltan Orban³,
Alexander N. Gumeniuk¹

¹ *Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU); Izhevsk, Russian Federation;*

² *Izhevsk State Agricultural Academy; Izhevsk, Russian Federation;*

³ *University of Pecs; Pecs, Hungary*

ABSTRACT

Introduction. It is confirmed that a dispersion of carbon black when it added to concrete is likely to increase its electrical conductivity. These materials are of great importance for construction for example for civil engineering, transportation and

energy industries. In that branches such materials could be used as snow melting systems, protective materials for metal bars, electromagnetically shielded materials. This study is about probable reason of electrically conductive properties in silicate-based material with carbon particles.

Materials and methods. Small molecular fragments which are the parts of modified concrete have been considered to investigate contact areas between carbon particles in silicate based material. Fire Fly has been chosen as software. Exchange-correlation phenomenon has been included by using B3LYP.

Results. An optimum percentage of modifier in mineral binder leads to the formation of an electrically conductive grid made of carbon nanoparticles. Electrical conductivity of material is influenced by contact areas between these nanoparticles. Quantum chemical molecular models of molecular fragments and interactions between these fragments have been made. Also, the impact of these areas on electrical conductivity was estimated.

Conclusions. Quantum chemical molecular models and analysis based on the optimum percentage of the modifier showed that electrical conductivity of the modified concrete depended on an electrons movement along the grid of carbon nanoparticles formed within the mineral matrix. The key role in electrical conductivity of the material plays contact areas between these particles. Electrical conductivity is increasing due to silicate-based components in molecular fragments.

KEYWORDS: silicate-based composites, quantum chemical molecular models, grapheme, carbon black, electrical conductivity, mineral binders, model fragments

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 19-53-26011.

FOR CITATION: Yakovlev G.I., Khokhriakov N.V., Polyanskikh I.S., Orban Z., Gumeniuk A.N. Applying the quantum chemical simulation to describe electrical conductivity in silicate-based materials. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1175-1186. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1175-1186 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr N. Gumenyuk, gumeniuk.an@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий требует увеличения функциональной нагрузки конструкций, зданий и сооружений для повышения экономической эффективности [1, 2]. В работах [2, 3] предложено совмещение свойств бетона воспринимать как статическую и динамическую нагрузку с электропроводностью, которую обеспечивают введением добавок, таких как стальное волокно и/или углеродсодержащий дисперсный порошок и др. Традиционный бетон имеет нестабильные диэлектрические характеристики, присутствие данных добавок обуславливает появление дополнительного свойства проводимости электрического тока. Прохождение тока способствует повышению температуры композита, появлению электромагнитных свойств [4], что определяет потенциал применения данного материала в строительной отрасли по следующим направлениям: обогрев помещений [5–7], заземление [8], электромагнитное экранирование [8], катодная защита арматурной стали [8], устранение статического электричества [7]. Как показывают прикладные исследования [9, 10], на сегодняшний день активно внедряется технология резистивного нагрева дорожных и аэродромных покрытий, а также технология самодиагностики конструкций на основе эффекта пьезорезистивности. Потребность в круглогодичном функционировании транспортной инфраструктуры делает внедрение технологий обогрева дорожных покрытий для аэропортов и зон с интенсивным движением востребованной, позволит повысить устойчивость инфраструктуры [11–13].

Однако анализ трудов [11, 14] показывает повсеместное использование дорогостоящих электропроводящих компонентов для обеспечения данного ряда свойств, что ставит под вопрос экономическую эффективность их применения. В свою очередь в пуб-

ликациях [5, 15, 16] предложено применение отходов антропогенного происхождения при изготовлении электропроводящего бетона. Так, проведены исследования влияния различных отходов промышленного производства на электротехнические свойства матриц, в том числе были использованы: техническая сажа [2], асфальтены [2, 4], стальная стружка [10], шлак электродуговых печей [6], порошок технического углерода и наночастицы технического углерода [5], зола уноса [6], коксовый порошок [6], углеродистый шлам алюминиевого производства [11]. Изучение влияния представленных техногенных добавок на эксплуатационные свойства и структурообразование минеральных матриц подтвердили, что морфология, дисперсность и равномерное распределение в структуре проводящих компонентов воздействуют на проводимость в большей степени, чем повышение концентрации добавок, однако необходимо подробное описание механизмов, обеспечивающих данное свойство для стабилизации и воспроизводимости результатов.

Для создания электропроводящего бетона [3–6] преимущественно используют углеродсодержащие мелкодисперсные порошки, углеродное и стальное волокно, при этом применение данных добавок имеет определенные ограничения. Добавление мелко- и ультрадисперсных углеродсодержащих порошков может значительно улучшить электропроводность минеральной матрицы, однако превышение порога оптимальной концентрации приводит к снижению механических свойств.

В зависимости от концентрации и морфологических характеристик электропроводящих добавок можно выделить три различных типа электропроводящей структуры в минеральной матрице (*A*, *B* и *C*). Тип *A* содержит концентрацию мелкодисперсной электропроводящей добавки ниже, чем критическое

содержание, называемое порогом перколяции, которое обеспечивает снижение удельного электрического сопротивления материала. В данном типе преобладает ионная проводимость, которая связана с движением ионов в поровой жидкости. С течением времени удельное электрическое сопротивление таких матриц повышается за счет снижения количества жидкости в порах. Тип *B* представляет собой электропроводящую структуру, сформированную из частиц и волокон с относительным удлинением, в которой увеличение содержания проводящего наполнителя обеспечивает постепенное снижение удельного электрического сопротивления. Электропроводность обеспечивается ионной проводимостью и электронной проводимостью за счет контакта проводящих компонентов. Тип *C* формируют применением мелкодисперсных добавок и углеродсодержащего волокна с дополнительным содержанием проводящих примесей, снижающих удельное электрическое сопротивление [11, 13, 15].

Показатель удельного объемного электрического сопротивления обратно пропорционален электропроводности материала, основным методом его расчета на сегодняшний день является отношение произведения площади поперечного сечения и сопротивления на электродах образца к длине между электродами [5]. Тем не менее известные в настоящее время методики определения и расчета удельного сопротивления рассматриваются с точки зрения представления бетона как конгломерата, не принимая во внимание особенности процессов, обеспечивающих стабильные значения удельного сопротивления.

Теоретические подходы и, в частности, квантово-химические методы моделирования приобретают все большее значение при решении актуальных задач в области материаловедения. Результаты теоретических исследований строения и реакционной способности неорганических соединений дополняют данные экспериментальных исследований, упрощают их интерпретацию и позволяют получить важную информацию.

В представленной работе для уточнения механизма проводимости бетона, модифицированного углеродсодержащими техногенными добавками, использован метод квантово-химического моделирования. Данный метод широко применяется при изучении свойств и структуры бетона и его взаимодействия с модификаторами [17–24]. Исследователи используют все типы молекулярных моделей: первопринципные [17–20] и полуэмпирические [21] методы квантовой химии, а также методы силового поля [21–23], основанные на эмпирических функциях атомных координат. В указанных трудах анализируются механические характеристики и процессы формирования структуры минерального вяжущего. Вопросы электропроводности ранее не рассматривались в рамках молекулярных моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования контактных областей между углеродными наночастицами в силикатной матрице проводились расчеты малых молекулярных фрагментов, присутствующих в модифицированном бетоне. Эмпирические данные, использованные для проведения расчетов, были получены на основании результатов поисковых исследований по оптимизации количества электропроводящих добавок на базе техногенного сырья для силикатных матриц [12, 16]. Рассматривались незаряженные молекулярные фрагменты. Оборванные химические связи компенсировались атомами водорода или функциональными группами. Высокая электрическая проводимость углеродных наночастиц объясняется содержанием в них областей с графитоподобной структурой, которые моделировались дефектными графеновыми кластерами конечного размера. Расчеты выполнены методом функционала плотности с помощью программы FireFly [25], разработанной на основе GAMESS (US) [26]. Обменно-корреляционные эффекты учитывались с использованием функционала B3LYP [17]. С целью описания атомных орбиталей кислорода, кальция и кремния использовался базисный набор 6-311+G* с дополнительными базисными функциями для оценки эффектов поляризации и диффузными орбиталями [27–30]. Для атомов углерода и водорода применялся меньший базис 6-31G [31, 32]. Базисные наборы взяты из системы BasisSetExchange [33]. Поскольку размер модельного графенового кластера достаточно велик, а атомы расположены близко друг к другу, уменьшенный базис для атомов углерода и водорода не должен привести к значительным ошибкам. Оптимизация геометрии молекулярных фрагментов выполнялась методом градиентного спуска. Иллюстрации к работе выполнены с использованием программы Facio [34].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выдвижения предварительной гипотезы о преимущественном механизме проводимости модифицированных силикатных матриц необходимо учесть, что удельное электрическое сопротивление бетона находится в пределах 10 Ом·м в зависимости от образца [35, 36]. В то же время удельное электрическое сопротивление графита близко к 10⁻⁷ Ом·м [30]. Таким образом, электрические токи будут протекать преимущественно по фрагментам графитоподобной структуры в композитном материале.

В качестве базового состава для расчетов принят состав мелкозернистого бетона, в котором количество углеродных наночастиц в составе композита довели до 7 % по массе [37]. Исходя из этого оптимально подобранного количества модификатора, можно оценить вероятность примыкания углеродных наночастиц друг к другу. Примем, что плотность бетонной

композиции составляет 2000 кг/м^3 . Согласно экспериментальным данным, размеры наночастиц в рассматриваемых образцах составили: ширина $2 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, длина $5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Для грубой оценки можно считать наночастицу листом графена прямоугольной формы. В таком случае площадь листа $S = 10^{-16} - 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. При таких исходных данных можно показать, что в объеме минерального вяжущего на расстоянии не более $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ от графеновой ленты в среднем окажется не менее 500 атомов углерода, принадлежащих другим углеродным наночастицам. Таким образом, при рассматриваемой доле углеродных наночастиц в силикатной матрице, каждый из графеновых объектов в нанокompозите контактирует с другими наночастицами графена. Под контактом в этом случае подразумевается расположение двух графеновых листов на расстоянии, близком к $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, характерном для межплоскостного расстояния в графите.

Разумеется, реальное количество таких контактов будет меньше из-за того, что листы графена в нанокompозите будут образовывать «пачки», которые не полностью разделятся на отдельные листы за счет взаимодействия с полярной средой. Кроме того, значительная часть углеродных объектов не имеет графитоподобной структуры. Тем не менее каждая графеновая наночастица с высокой вероятностью будет находиться в близком контакте с другими наночастицами графена. Внутри модифицированного бетона образуется разветвленная сетка из вытянутых графеновых наночастиц (рис. 1), которая может привести к значительному росту проводимости образца из-за высокой электропроводности графена.

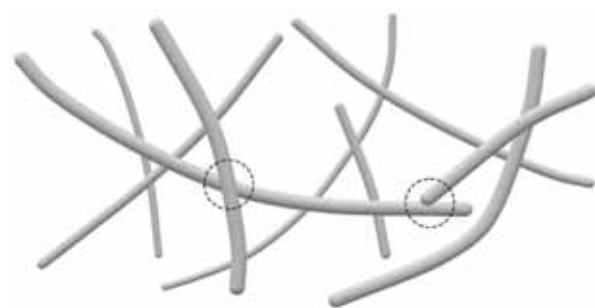


Рис. 1. Сетка графеновых наночастиц в образце. Области контактов наночастиц обведены окружностями

Fig. 1. Graphene nanoparticles in the sample. The contact areas of nanoparticles are circled

Присутствие в силикатном образце некоторого количества соединений переходных металлов и активных анионов в жидкой фазе может привести к образованию химических связей между отдельными наночастицами. Однако на основе имеющихся расчетных и экспериментальных данных нельзя утверждать, что будет образовываться много химических контактов из-за малого количества переходных ме-

таллов и низких температур протекания всех процессов. Итак, преимущественная природа контактов не будет базироваться на химических связях между их атомами. Такие контактные области будут иметь низкую электропроводность и обеспечат основной вклад в электрическое сопротивление образца. Известен факт, что проводимость графита вдоль плоскостей на 3–4 порядка выше, чем проводимость в направлении, перпендикулярном плоскостям [36]. Проводимость в направлении, перпендикулярном плоскостям графита, имеет такую же природу, что и проводимость между близкими наночастицами. Она обусловлена туннелированием электронов через потенциальный барьер, который формируется высоким потенциалом электрона в межплоскостном пространстве. При этом проводимость контакта будет значительно ниже, чем между графитовыми плоскостями, из-за его малой площади. Туннельный ток через потенциальный барьер между двумя наночастицами определяется экспоненциальной зависимостью:

$$I \sim e^{-\sqrt{\frac{2m\Delta E}{\hbar^2}}L},$$

где m — эффективная масса электрона в наночастице; ΔE — высота потенциального барьера; $\hbar$ — постоянная Планка; L — расстояние между проводящими наночастицами.

Поэтому электрическая проводимость быстро падает с увеличением расстояния между нанообъектами и увеличением высоты потенциального барьера. Дополнительное влияние на проводимость могут оказать молекулярные фрагменты силикатной матрицы, расположенные в окрестности контакта углеродных наночастиц. Наличие у этих молекулярных фрагментов незаполненных молекулярных орбиталей отрицательной энергии приводит к уменьшению высоты потенциального барьера и увеличению тока, протекающего через контакт.

Методом функционала плотности выполнены расчеты малых фрагментов минерального вяжущего и их взаимодействия с листом графена. В качестве модели графеновой наночастицы был выбран малый фрагмент $\text{C}_{38}\text{H}_{16}$ (рис. 2, а). При этом оборванные связи атомов углерода скомпенсированы атомами водорода. На рис. 2 и других атомы углерода изображаются темно-серыми шарами, атомы водорода — светло-серыми, а атомы кислорода — шарами красного цвета. В экспериментальных исследованиях использовался графен с высокой степенью дефектности, содержащий различные функциональные группы. Поэтому при расчетах также рассмотрены фрагменты графеновой плоскости с простейшими функциональными группами. Эти структуры также показаны на рис. 2. На рис. 2, б приведена структура, содержащая кислородный мостик между двумя соседними атомами углерода. На рис. 2, с представлена структура, содержащая две гидроксильные группы.

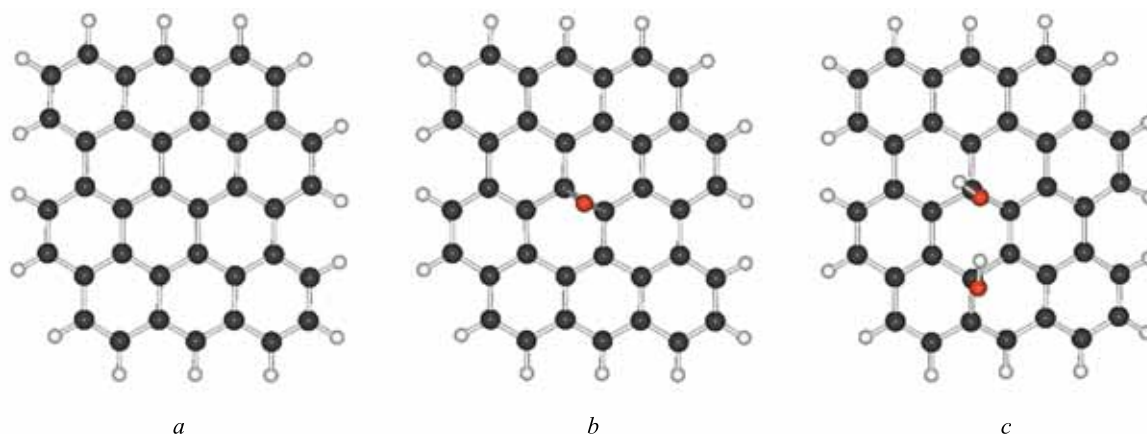


Рис. 2. Модельный фрагмент наночастицы графена (а); модельный фрагмент наночастицы графена с кислородным мостиком (b); модельный фрагмент наночастицы графена с двумя гидроксильными группами (с)

Fig. 2. A model part of a graphene nanoparticle (a); a model part of a graphene nanoparticle with an oxygen bridge (b); a model part of a graphene nanoparticle with two hydroxyl groups (c)

Кроме того, исследовался фрагмент графена с кислородным мостиком, соединяющим атомы углерода, расположенные в противоположных углах углеродного шестиугольника. В результате минимизации энергии системы атом кислорода сместился в позицию над центром C–C связи, и эта структура превратилась в структуру, изображенную на рис. 2, а.

Выполнены квантово-химические расчеты взаимодействия графена, содержащего функциональные группы, с кальцием. Расчеты показали, что при этом происходит восстановление идеальной графеновой структуры с образованием соответствующих соединений кальция. Этот факт согласуется с существующими экспериментальными данными [38]. Электропроводность графена сильно зависит от содержания дефектов в его структуре [39]. Поскольку в жидкой фазе минерального композита высока концентрация ионов кальция, плотность дефектов графеновой наночастицы, контактирующей с жидкой фазой, будет снижаться. Это приведет к повышению электропроводности наночастиц. Побочным эффектом станет нарушение компонентного состава жидкой фазы, что в свою очередь может повлиять на прочностные характеристики бетона. Значительное снижение прочности наблюдается экспериментально при содержании углеродных наночастиц более 7 % по массе.

Рассмотрено взаимодействие графенового фрагмента идеальной структуры со следующими молекулами, присутствующими в среде в процессе образования структуры силикатных композитов: CaO, H₂O, Ca(OH)₂, с нейтральным атомом и ионом кальция. Кроме того, изучено взаимодействие графенового кластера с модельным фрагментом структуры силикатной матрицы Ca₂SiO₄ (рис. 3), в которой присутствует характерный тетраэдр SiO₄, а вакантные связи атомов кислорода тетраэдра компенсируются двумя атомами кальция. На рис. 3 и далее атомы кальция изображаются большими шарами черного цвета,

а атомы кремния — серыми шарами. Оптимизация энергии системы показывает, что в большинстве случаев происходит сближение графена с ионами кальция (рис. 4, 5). Этот результат находится в согласии с исследованиями других авторов [22]. Исключение составляет комплекс с гидроксидом кальция, который переходит на периферию кластера, при этом атомы кислорода сближаются с водородами, расположенными на границах графена. Энергия взаимодействия с графеновой плоскостью для всех систем близка к 0,5 эВ. Взаимодействие графена с молекулярными фрагментами, содержащими ион кальция, оказалось значительно сильнее, чем взаимодействие с атомом кальция, молекулой воды и межплоскостное взаимодействие между графеновыми фрагментами. При этом наиболее сильным оказалось взаимодействие со структурным фрагментом, показанным на рис. 3. Таким образом, велика вероятность размещения графеновых плоскостей вдоль плоскостей структуры, образованных ионами кальция. В случае присутствия в структуре графена полярных функциональных групп сила его взаимодействия со слоями минеральной матрицы может возрасти в 18 раз [22].

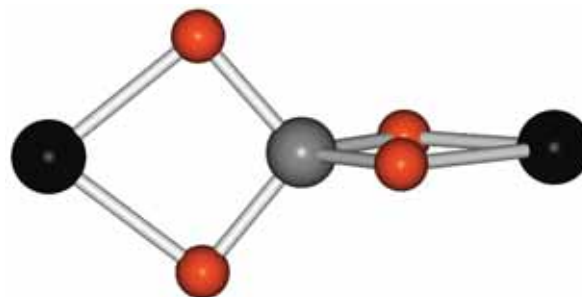


Рис. 3. Модельный фрагмент частицы минерального вяжущего

Fig. 3. Model part of a mineral binder particle

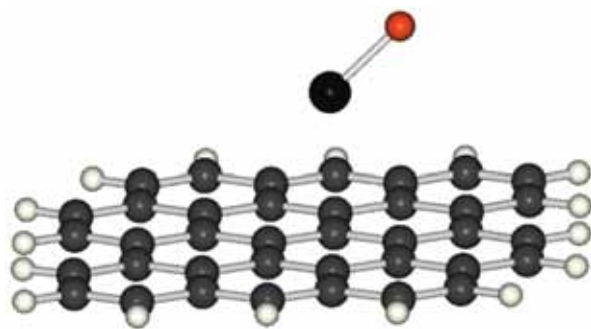


Рис. 4. Геометрическая структура комплекса, образованного графеном и CaO

Fig. 4. Geometric structure of the complex formed by graphene and CaO

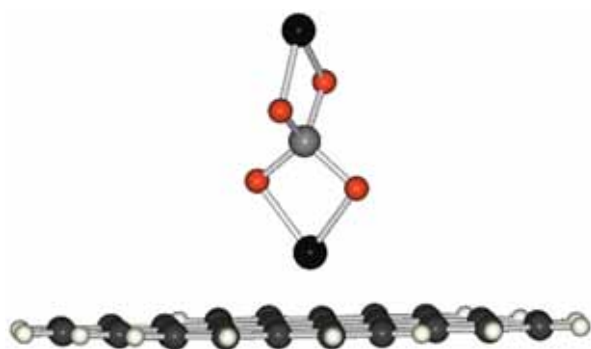


Рис. 5. Геометрическая структура комплекса, образованного модельными фрагментами графена и минерального вяжущего

Fig. 5. Geometric structure of the complex formed by model parts of graphene and mineral binder

Представляет интерес возможность расположения фрагмента Ca_2SiO_4 в области контакта графеновых частиц. Проведено два вычислительных эксперимента для систем, состоящих из фрагмента Ca_2SiO_4 и двух графеновых кластеров. Начальное и конечное расположение молекулярных систем для двух вариантов образования контактных областей приведено на рис. 6–9. Структура, представленная на рис. 9, по энергии оказалась более предпочтительной, но разница составила не более 0,1 эВ. Результаты расчетов показывают, что во всех случаях фрагмент Ca_2SiO_4 попадает в область контакта между графеновыми кластерами.

Оценим влияние рассмотренных молекулярных фрагментов на проводимость контактов между графеновыми наночастицами. Можно принять, что ток в основном обеспечивается электронами, попадающими в зону проводимости, соответствующую низшему незаполненному энергетическому уровню молекулярного фрагмента (LUMO). В таблице приводятся расчетные значения этого уровня в эВ для всех рассмотренных молекул и кластеров.

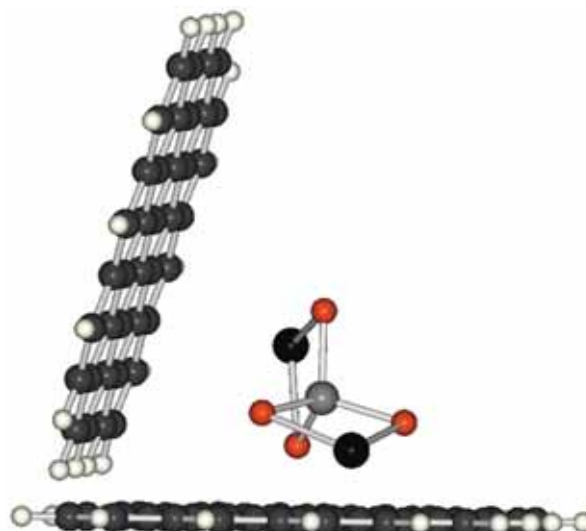


Рис. 6. Начальное расположение модельного фрагмента минерального вяжущего и двух графеновых кластеров

Fig. 6. Initial arrangement of a model part of a mineral binder and two graphene clusters

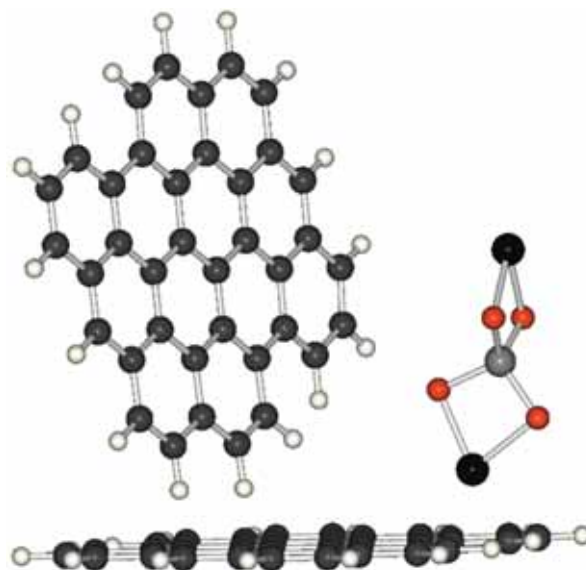


Рис. 7. Геометрия системы, показанной на рис. 6, после минимизации энергии

Fig. 7. The geometry of the system shown in Fig. 6, after energy minimization



Рис. 8. Начальное расположение модельного фрагмента минерального вяжущего и двух графеновых кластеров

Fig. 8. Initial arrangement of a model fragment of a mineral binder and two graphene clusters

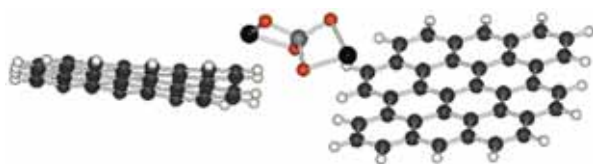


Рис. 9. Геометрия системы, показанной на рис. 8, после минимизации энергии

Fig. 9. The geometry of the system shown in Fig. 8, after energy minimization

Энергии низших незанятых энергетических уровней, эВ
Energies of the lowest unoccupied energy levels, eV

Молекула / Molecule	E_{LUMO} , эВ / eV
H ₂ O	0,52
Графен / Graphene	–2,43
Ca	–1,02
Ca(OH) ₂	–1,55
Ca ₂ SiO ₄	–1,83
CaO	–2,32

Таким образом, при попадании в область контакта любой молекулы из таблицы (кроме воды) произойдет снижение энергетического барьера для туннелирования электронов между кластерами графена. Учитывая экспоненциальный характер зависимости туннельного тока от величины энергетического барьера, небольшое его снижение может привести к значительному повышению тока через контакт. В то же время потенциальный барьер не снижается при попадании в контактную область молекулы воды.

Этот факт и дополнительное рассеяние электронов за счет взаимодействия с возбуждениями атомной решетки, индуцируемыми взаимодействием с жидкой средой, приводят к росту электронной проводимости системы в процессе затвердевания раствора. При этом ионная проводимость будет снижаться из-за уменьшения содержания жидкой фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен и обоснован механизм электрической проводимости силикатных матриц, модифицированных углеродными наночастицами. Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- проводимость электронов в модифицированной силикатной матрице обеспечивается сеткой углеродных наночастиц. Основной вклад в электрическое сопротивление вносят области контактов между наночастицами;
- присутствие силикатной матрицы снижает электрическое сопротивление контактных областей между углеродными наночастицами;
- графитоподобные наночастицы преимущественно располагаются вдоль граней кристаллитов силикатной матрицы, содержащих наибольшее количество ионов кальция;
- дефектность углеродных наночастиц может снижаться за счет взаимодействия их функциональных групп с ионами кальция из геля минерального вяжущего. При этом прочностные характеристики силикатного композита склонны к снижению;
- электронная проводимость материала возрастает в процессе затвердевания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang X., Wu Y., Zhu P., Ning T. Snow melting performance of graphene composite conductive concrete in severe cold environment // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 21. P. 6715. DOI: 10.3390/ma14216715
2. Cordon H.C.F., Tadini F.B., Akiyama G.A., de Andrade V.O., da Silva R.C. Development of electrically conductive concrete // *Cerâmica*. 2020. Vol. 66. Issue 377. Pp. 88–92. DOI: 10.1590/0366-69132020663772775
3. Liu X., Qu M., Nguyen A.P.T., Dilley N.R., Yaza-wa K. Characteristics of new cement-based thermoelectric composites for low-temperature applications // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 304. P. 124635. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124635
4. Makul N. Advanced smart concrete — A review of current progress, benefits and challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274. P. 122899. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122899
5. Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 221. Pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025
6. Fiala L., Pommer V., Böhm M., Scheinherrová L., Černý R. Self-heating alkali activated materials: Microstructure and its effect on electrical, thermal and mechanical properties // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 335. P. 127527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127527
7. Rahman M.L., Malakooti A., Ceylan H., Kim S., Taylor P.C. A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329. P. 127139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127139
8. Zukowski B., dos Santos Mendonça Y.G., de Souza J.V.B., Filho R.D.T. Cement-based EMI shielding materials // *Materials for Potential EMI Shielding Applications*. 2020. Pp. 333–340. DOI: 10.1016/B978-0-12-817590-3.00020-8

9. Tuan C.Y. Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge). Lincoln, 2008.
10. Sassani A., Arabzadeh A., Ceylan H., Kim S., Sadati S.M.S., Gopalakrishnan K. et al. Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. Pp. 799–809. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.315
11. Hornbostel K., Larsen C.K., Geiker M.R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate — A literature review // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 39. Pp. 60–72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
12. Lee H., Park S., Kim D., Chung W. Heating performance of cementitious composites with carbon-based nanomaterials // *Crystals*. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 716. DOI: 10.3390/cryst12050716
13. Денисюк И.Ю., Успенская М.В., Фокина М.И., Логушкова К.Ю. Электропроводящая композиция бетона // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 1. С. 158–162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162
14. García-Macías E., D'Alessandro A., Castro-Triguero R., Pérez-Mira D., Ubertini F. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 108. Pp. 451–469. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.025
15. Dehghanpour H. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 221. Pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025
16. Gumenyuk A.N., Polyanskikh I.S., Pudov I.A., Shevchenko F.E., Kuzmina N.V., Yakovlev G.I. Directed regulation and localization of electrical properties for composite construction materials // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 325 SSP. Pp. 119–124. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.119
17. Mai N.L., Hoang N.-H., Do H.T., Pilz M., Trinh T.T. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: Insights from first principles calculations // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287. P. 122873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122873
18. Yang K., White C.E. Modeling of aqueous species interaction energies prior to nucleation in cement-based gel systems // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 139. P. 106266. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106266
19. Zhao R., Zhang L., Fan G., Chen Y. Probing the exact form and doping preference of magnesium in ordinary Portland cement clinker phases: A study from experiments and DFT simulations // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 144. P. 106420. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106420
20. Khokhriakov N.V., Yakovlev G.I., Kodolov V.I. Modelling of hydration of calcium sulfate hemihydrate // *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2000. Vol. 2. Issue 2. Pp. 205–213.
21. Estolano A.M.L., Lima N.B., Junior R.V.A., Belarmino M.K.D.L., Silva A.I.S., Nascimento C.F.G. et al. Concrete paving blocks: Structural, thermodynamic, fluorescence, optical and mechanical properties // *Journal of Molecular Structure*. 2019. Vol. 1184. Pp. 443–451. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.02.048
22. Zhou Y., Xiong C., Peng Z., Huang J., Chang H. Molecular dynamics simulation of the interfacial interaction mechanism between functional groups on graphene-based two-dimensional matrix and calcium silicate hydrate // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 284. P. 122804. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122804
23. Sanchez F., Zhang L. Molecular dynamics modeling of the interface between surface functionalized graphitic structures and calcium-silicate-hydrate: Interaction energies, structure, and dynamics // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 323. Issue 2. Pp. 349–358. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.04.023
24. Hou D. Molecular dynamics study on cement-graphene nanocomposite // *Molecular Simulation on Cement-Based Materials*. 2020. Pp. 159–185. DOI: 10.1007/978-981-13-8711-1_7
25. Granovsky A.A. Firefly version 8. URL: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
26. Schmidt M.W., Baldridge K.K., Boatz J.A., Elbert S.T., Gordon M.S., Jensen J.H. et al. General atomic and molecular electronic structure system // *Journal of Computational Chemistry*. 1993. Vol. 14. Issue 11. Pp. 1347–1363 DOI: 10.1002/jcc.540141112
27. Becke A.D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // *The Journal of Chemical Physics*. 1993. Vol. 98. Issue 7. Pp. 5648–5652. DOI: 10.1063/1.464913
28. Blauddau J., McGrath M., Curtiss L., Radom L. Extension of Gaussian-2 (G2) theory to molecules containing third-row atoms K and Ca // *Journal of Chemical Physics*. 1995. Vol. 107. Pp. 5016–5021. DOI: 10.1063/1.474865
29. Krishnan R., Binkley J.S., Seeger R., Pople J.A. Self-consistent molecular orbital methods. XX. A basis set for correlated wave functions // *The Journal of Chemical Physics*. 1980. Vol. 72. Issue 1. Pp. 650–654. DOI: 10.1063/1.438955
30. McLean A.D., Chandler G.S. Contracted Gaussian basis sets for molecular calculations. I. Second row atoms, $Z = 11 - 18$ // *The Journal of Chemical Physics*. 1980. Vol. 72. Issue 10. Pp. 5639–5648. DOI: 10.1063/1.438980
31. Ditchfield R., Hehre W., Pople J. Self-consistent molecular-orbital methods. IX. An extended Gaussian-type basis for molecular-orbital studies of organic

molecules // Journal of Chemical Physics. 1971. Vol. 54. Pp. 724–728. DOI: 10.1063/1.1674902

32. *Hehre W., Ditchfield R., Pople J.* Self — consistent molecular orbital methods. XII. Further extensions of Gaussian — type basis sets for use in molecular orbital studies of organic molecules // Journal of Chemical Physics. 1972. Vol. 56. Pp. 2257–2261. DOI: 10.1063/1.1677527

33. *Pritchard B.P., Altarawy D., Didier B., Gibson T.D., Windus T.L.* New basis set exchange: An open, up-to-date resource for the molecular sciences community // Journal of Chemical Information and Modeling. 2019. Vol. 59. Issue 11. Pp. 4814–4820. DOI: 10.1021/acs.jcim.9b00725

34. *Suenaga M.* Facio is a free GUI for computational chemistry softwares (TINKER, MSMS, Firefly, Gamess, MOPAC and Gaussian). Facio has been developed by Masahiko Suenaga, Department of Chemistry, Graduate School of Science, Kyushu University, Japan. URL: <http://zzzfelis.sakura.ne.jp>

35. *Dong W., Huang Y., Lehane B., Aslani F., Ma G.* Mechanical and electrical properties of concrete incorporating an iron-particle contained nano-graphite by-product // Construction and Building Materials.

2021. Vol. 270. P. 121377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121377

36. *Banerjee S., Sardar M., Gayathri N., Tyagi A.K., Raj B.* Conductivity landscape of highly oriented pyrolytic graphite surfaces containing ribbons and edges // Physical review. B, Condensed matter. 2005. Vol. 72. Issue 7. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.075418

37. *Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S. et al.* Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 8. Issue 92. Pp. 163–172. DOI: 10.18720/MCE.92.14

38. *Бабаев А.А., Зобов М.Е., Корнилов Д.Ю., Ткачев С.В., Теруков Е.И., Левицкий В.С.* Оптические и электрические свойства оксида графена // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 820–824. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46945.90-18

39. *Zeng W., Tao X.-M., Lin S., Lee C., Shi D., Lam K. et al.* Defect-engineered reduced graphene oxide sheets with high electric conductivity and controlled thermal conductivity for soft and flexible wearable thermoelectric generators // Nano Energy. 2018. Vol. 54. Pp. 163–174. DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.10.015

Поступила в редакцию 9 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2022 г.

Одобрена для публикации 30 августа 2022 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Григорий Иванович Яковлев** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; SPIN-код: 6545-2779, ResearcherID: V-9517-2019, Scopus: 7006888927; ORCID: 0000-0002-2754-3967; gism@istu.ru;

Николай Владимирович Хохряков — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики; **Ижевская государственная сельскохозяйственная академия (Ижевская ГСХА)**; 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 11; SPIN-код: 6699-1254; khrv70@mail.ru;

Ирина Сергеевна Полянских — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; SPIN-код: 9921-9051, Scopus: 56789978800, ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Золтан Орбан — PhD, доцент, Исследовательская группа структурной диагностики и анализа; **Печский университет**; H-7624, г. Печ, Венгрия; Scopus: 25637382700; orban.zoltan@mik.pte.hu;

Александр Николаевич Гуменюк — ассистент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; SPIN-код: 6196-8655, ResearcherID: AАН-1846-2021, Scopus: 57204363802, ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrghumenyuk2017@yandex.ru.

Вклад авторов:

Яковлев Г.И. — концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Хохряков Н.В. — методология, обработка материала, написание статьи, итоговые выводы.

Полянских И.С. — идея, написание статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Орбан З. — сбор материала, обработка графического материала, доработка текста.

Гуменюк А.Н. — сбор и обработка материала, проведение лабораторных исследований, доработка текста.

REFERENCES

1. Wang X., Wu Y., Zhu P., Ning T. Snow melting performance of graphene composite conductive concrete in severe cold environment. *Materials*. 2021; 14(21):6715. DOI: 10.3390/ma14216715
2. Cordon H.C.F., Tadini F.B., Akiyama G.A., de Andrade V.O., da Silva R.C. Development of electrically conductive concrete. *Cerâmica*. 2020; 66(377):88-92. DOI: 10.1590/0366-69132020663772775
3. Liu X., Qu M., Nguyen A.P.T., Dilley N.R., Yazawa K. Characteristics of new cement-based thermoelectric composites for low-temperature applications. *Construction and Building Materials*. 2021; 304:124635. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124635
4. Makul N. Advanced smart concrete — A review of current progress, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 274:122899. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122899
5. Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials*. 2019; 221:109-121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025
6. Fiala L., Pommer V., Böhm M., Scheinherrová L., Černý R. Self-heating alkali activated materials: Microstructure and its effect on electrical, thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2022; 335:127527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127527
7. Rahman M.L., Malakooti A., Ceylan H., Kim S., Taylor P.C. A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Construction and Building Materials*. 2022; 329:127139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127139
8. Zukowski B., dos Santos Mendonça Y.G., de Souza J.V.B., Filho R.D.T. Cement-based EMI shielding materials. *Materials for Potential EMI Shielding Applications*. 2020; 333-340. DOI: 10.1016/B978-0-12-817590-3.00020-8
9. Tuan C.Y. *Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge)*. Lincoln, 2008.
10. Sassani A., Arabzadeh A., Ceylan H., Kim S., Sadati S.M.S., Gopalakrishnan K. et al. Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 203:799-809. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.315
11. Hornbostel K., Larsen C.K., Geiker M.R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate — A literature review. *Cement and Concrete Composites*. 2013; 39:60-72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
12. Lee H., Park S., Kim D., Chung W. Heating performance of cementitious composites with carbon-based nanomaterials. *Crystals*. 2022; 12(5):716. DOI: 10.3390/cryst12050716
13. Denisyuk I.Yu., Uspenskaya M., Fokina M.I., Logushkova K. Conductive concrete composition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018; 18(1):158-162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162 (rus.).
14. García-Macías E., D'Alessandro A., Castro-Triguero R., Pérez-Mira D., Ubertini F. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 108:451-469. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.025
15. Dehghanpour H. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials*. 2019; 221:109-121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025>
16. Gumenyuk A.N., Polyanskikh I.S., Pudov I.A., Shevchenko F.E., Kuzmina N.V., Yakovlev G.I. Directed regulation and localization of electrical properties for composite construction materials. *Solid State Phenomena*. 2021; 325 SSP:119-124. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.119
17. Mai N.L., Hoang N.-H., Do H.T., Pilz M., Trinh T.T. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: Insights from first principles calculations. *Construction and Building Materials*. 2021; 287:122873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122873
18. Yang K., White C.E. Modeling of aqueous species interaction energies prior to nucleation in cement-based gel systems. *Cement and Concrete Research*. 2021; 139:106266. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106266
19. Zhao R., Zhang L., Fan G., Chen Y. Probing the exact form and doping preference of magnesium in ordinary Portland cement clinker phases: A study from experiments and DFT simulations. *Cement and Concrete Research*. 2021; 144:106420. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106420
20. Khokhriakov N.V., Yakovlev G.I., Kodo-lov V.I. Modelling of hydration of calcium sulfate hemihydrate. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2000; 2(2):205-213.
21. Estolano A.M.L., Lima N.B., Junior R.V.A., Belarmino M.K.D.L., Silva A.I.S., Nascimento C.F.G. et al. Concrete paving blocks: Structural, thermodynamic, fluorescence, optical and mechanical properties. *Journal of Molecular Structure*. 2019; 1184:443-451. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.02.048
22. Zhou Y., Xiong C., Peng Z., Huang J., Chang H. Molecular dynamics simulation of the interfacial interaction mechanism between functional groups on graphene-based two-dimensional matrix and calcium silicate hydrate. *Construction and Building Materials*. 2021; 284:122804. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122804

23. Sanchez F., Zhang L. Molecular dynamics modeling of the interface between surface functionalized graphitic structures and calcium-silicate-hydrate: Interaction energies, structure, and dynamics. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008; 323(2):349-358. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.04.023
24. Hou D. Molecular dynamics study on cement-graphene nanocomposite. *Molecular Simulation on Cement-Based Materials*. 2020; 159-185. DOI: 10.1007/978-981-13-8711-1_7
25. Granovsky A.A. Firefly version 8. URL: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
26. Schmidt M.W., Baldrige K.K., Boatz J.A., Elbert S.T., Gordon M.S., Jensen J.H. et al. General atomic and molecular electronic structure system. *Journal of Computational Chemistry*. 1993; 14(11):1347-1363. DOI: 10.1002/jcc.540141112
27. Becke A.D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *The Journal of Chemical Physics*. 1993; 98(7):5648-5652. DOI: 10.1063/1.464913
28. Blaudeau J., McGrath M., Curtiss L., Radom L. Extension of Gaussian-2 (G2) theory to molecules containing third-row atoms K and Ca. *Journal of Chemical Physics*. 1995; 107:5016-5021. DOI: 10.1063/1.474865
29. Krishnan R., Binkley J.S., Seeger R., Pople J.A. Self-consistent molecular orbital methods. XX. A basis set for correlated wave functions. *The Journal of Chemical Physics*. 1980; 72(1):650-654. DOI: 10.1063/1.438955
30. McLean A.D., Chandler G.S. Contracted Gaussian basis sets for molecular calculations. I. Second row atoms, $Z = 11 - 18$. *The Journal of Chemical Physics*. 1980; 72(10):5639-5648. DOI: 10.1063/1.438980
31. Ditchfield R., Hehre W., Pople J. Self-consistent molecular-orbital methods. IX. An extended gaussian-type basis for molecular-orbital studies of organic molecules. *Journal of Chemical Physics*. 1971; 54:724-728. DOI: 10.1063/1.1674902
32. Hehre W., Ditchfield R., Pople J. Self — consistent molecular orbital methods. XII. Further extensions of Gaussian — type basis sets for use in molecular orbital studies of organic molecules. *Journal of Chemical Physics*. 1972; 56:2257-2261. DOI: 10.1063/1.1677527
33. Pritchard B.P., Altarawy D., Didier B., Gibson T.D., Windus T.L. New basis set exchange: An open, up-to-date resource for the molecular sciences community. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2019; 59(11):4814-4820. DOI: 10.1021/acs.jcim.9b00725
34. Suenaga M. Facio is a free GUI for computational chemistry softwares (TINKER, MSMS, Firefly, Gamess, MOPAC and Gaussian). Facio has been developed by Masahiko Suenaga, Department of Chemistry, Graduate School of Science, Kyushu University, Japan. URL: <http://zzzfelis.sakura.ne.jp>
35. Dong W., Huang Y., Lehane B., Aslani F., Ma G. Mechanical and electrical properties of concrete incorporating an iron-particle contained nano-graphite by-product. *Construction and Building Materials*. 2021; 270:121377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121377
36. Banerjee S., Sardar M., Gayathri N., Tyagi A.K., Raj B. Conductivity landscape of highly oriented pyrolytic graphite surfaces containing ribbons and edges. *Physical review. B, Condensed matter*. 2005; 72(7). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.075418
37. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S. et al. Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 8(92):163-172. DOI: 10.18720/MCE.92.14
38. Babaev A.A., Zobov M.E., Kornilov D.Y., Tkachev S.V., Terukov E.I., Levitskii V.S. Optical and electrical properties of graphene oxide. *Optics and Spectroscopy*. 2018; 125(6):820-824. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46945.90-18 (rus.).
39. Zeng W., Tao X.-M., Lin S., Lee C., Shi D., Lam K. et al. Defect-engineered reduced graphene oxide sheets with high electric conductivity and controlled thermal conductivity for soft and flexible wearable thermoelectric generators. *Nano Energy*. 2018; 54:163-174. DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.10.015

Received June 9, 2022.

Adopted in revised form on August 12, 2022.

Approved for publication on August 30, 2022.

B I O N O T E S : **Grigorij I. Yakovlev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, Institute of Construction and Architecture named after V.A. Shumilova; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; SPIN-code: 6545-2779, ResearcherID: V-9517-2019, Scopus: 7006888927; ORCID: 0000-0002-2754-3967; gism@istu.ru;

Nikolaj V. Khokhriakov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics; **Izhevsk State Agricultural Academy**; 11 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Izhevsk, Russian Federation; SPIN-code: 6699-1254; khv70@mail.ru;

Irina S. Polyanskikh — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials of Mechanization and Geotechnics, Institute of Construction and Architecture named after V.A. Shumilova; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; SPIN-code: 9921-9051, Scopus: 56789978800; ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Orban Zoltan — PhD, Associate Professor, Structural Diagnostics and Analysis Research Group; **University of Pécs**; H-7624, Pécs, Hungary; Scopus: 25637382700; orban.zoltan@mik.pte.hu;

Alexander N. Gumeniuk — Assistant of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, Institute of Construction and Architecture named after V.A. Shumilova; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; SPIN-code: 6196-8655, ResearcherID: AAH-1846-2021, Scopus: 57204363802, ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrgumenyuk2017@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Grigorij I. Yakovlev — conceptualization, scientific editing of the text, conclusions.

Nikolaj V. Khokhriakov — methodology, data processing, writing of the article, conclusions.

Irina S. Polyanskikh — idea, writing of the article, scientific editing of the text, conclusions.

Orban Zoltan — data gathering, scientific editing of the text.

Alexander N. Gumeniuk — data gathering and processing, laboratory testing, scientific editing of the text.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / REASERCH PAPER

УДК 502/504

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205

Методика обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами

Елена Владимировна Сысоева, Маргарита Олеговна Гельманова,
Михаил Юрьевич Слесарев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ практического и теоретического опыта показывает значительное влияние «зеленых» крыш на снижение концентраций $PM_{2.5}$, однако существующие методики не позволяют при расчете концентрации загрязняющих веществ учитывать пылепоглотельную способность насаждений в отношении частиц $PM_{2.5}$. Цель исследования — создание методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в целях повышения экологической безопасности городской среды (применительно к РФ) в соответствии с предложенной типологией на основании разработанной математической модели.

Материалы и методы. Применены аналитическое обобщение и систематизация научных исследований, математические методы.

Результаты. Разработанная методика представляет собой последовательность 29 действий, осуществление которых приведет к получению вывода о том, стоит ли озеленять существующую крышу здания, и будет ли это эффективно с точки зрения снижения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в воздушной среде. Выполнение действий сопряжено с проведением расчета в соответствии с математической моделью. Окончательным численным результатом данной методики будет являться осредненное за летний период времени суточное накопление пыли на поверхности «зеленой» крыши в граммах. Чем больше данное значение, тем более эффективно устройство «зеленой» крыши в выбранном месте с точки зрения повышения экологической безопасности города.

Выводы. Данная методика имеет практическую значимость и может быть использована при различных градостроительных сценариях, когда необходимо численно оценить эффективность применения «зеленой» крыши на том или ином здании, что проводится на этапе проектирования путем сопоставления различных вариантов размещения «зеленых» крыш и выбора наиболее оптимального из них (для которого при прочих равных условиях осредненное за летний период времени суточное накопление пыли $PM_{2.5}$ на поверхности «зеленой» крыши в граммах будет наибольшим) с точки зрения обеспечения экологической безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: загрязнение воздуха, выбросы автотранспорта, мелкодисперсные частицы $PM_{2.5}$, «зеленые» крыши, озеленение городских территорий, экологическая безопасность городской среды

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сысоева Е.В., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. Методика обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1187–1205. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Сысоева, SysoevaEV@mgsu.ru.

Methodology for substantiating the effectiveness of dust capture by “green” roofs

Elena V. Sysoeva, Margarita O. Gelmanova, Mikhail Yu. Slesarev
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The analysis of practical and theoretical experience shows a significant impact of “green” roofs to reduce the concentration of $PM_{2.5}$, but the existing methods do not allow in calculating the concentration of pollutants to take into account the dust absorption capacity of the plantations in respect of $PM_{2.5}$ particles. The aim of this work is to create a method to justify the effectiveness of “green” roofs to reduce fine $PM_{2.5}$ particles to increase the environmental safety of the urban environment (as applied to the RF) according to the proposed typology based on the developed mathematical model.

Materials and methods. Analytical generalization and systematization of scientific research, mathematical methods were applied.

Results. The developed method represents a sequence of 29 actions, the implementation of which will lead to a conclusion about whether to green the existing building roof, and whether it will be effective in terms of reducing the concentration of fine particles $PM_{2.5}$ in the air environment. Performing the actions involves performing a calculation in accordance with a mathematical model. The final numerical result of this methodology will be the average for the summer period of time daily accumulation of dust on the surface of the "green" roof in grams. The greater the value, the more effective the device "green" roof in the selected location in terms of improving the environmental safety of the city.

Conclusions. The developed method has practical significance and can be used in various urban planning scenarios, when it is necessary to evaluate numerically the effectiveness of the "green" roof on a particular building, which is carried out at the design stage by comparing different options for placement of "green" roofs and choose the best of them (for which, other things being equal, the average daily dust accumulation $PM_{2.5}$ for the summer period in grams on the surface of the "green" roof will be the greatest) in terms of ensuring environmental safety.

KEYWORDS: air pollution, motor vehicle emissions, fine particulate matter $PM_{2.5}$, "green" roofs, urban greening, environmental safety of the urban environment

FOR CITATION: Sysoeva E.V., Gelmanova M.O., Slesarev M.Yu. Methodology for substantiating the effectiveness of dust capture by "green" roofs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1187-1205. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Sysoeva, SysoevaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздушной среды пылевыми частицами на территориях крупных городов продолжает оставаться актуальной проблемой во всем мире [1, 2]. Одними из наиболее распространенных загрязнителей в воздушной среде урбанизированных территорий являются мелкодисперсные частицы $PM_{2.5}$ [3], преимущественно образующиеся при движении автотранспортных средств [4]. Длительное воздействие $PM_{2.5}$ — колоссальный экологический фактор риска для здоровья человека [5]. Способствует появлению и прогрессированию сердечно-сосудистых заболеваний [6, 7], респираторных [8], онкологических [9] и нейродегенеративных заболеваний [10], что приводит к сокращению продолжительности жизни [11, 12].

В условиях высокой запыленности воздушной среды крайне важна способность среды сопротивляться распространению загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере, что обеспечивается достаточной площадью озелененных территорий. Система городского озеленения, служащая элементом природного каркаса города, представляет собой неотъемлемую часть планировочной структуры города и имеет большое значение в обеспечении, а также повышении экологической безопасности городской среды [13].

В особенности городское озеленение влияет на микроклимат урбанизированной территории, делая его комфортным для проживания горожан. Организация растительности приводит к снижению температуры воздуха в теплое время года (смягчение эффекта «городского острова тепла» [14]) и увеличению влажности воздуха, способствует сохранению биоразнообразия, позволяет улучшить качество воздуха, уменьшив содержание вредных для здоровья человека примесей и пыли. В современных исследованиях большое внимание уделяется вопросам снижения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ путем озеленения городских территорий [15–19]. Уменьшение концентраций пылевых частиц обеспечивается за счет их осаждения на поверхности

листьев зеленых насаждений [20]. Существующие исследования подтверждают способность зеленых насаждений поглощать некоторые ЗВ из атмосферы, в том числе и $PM_{2.5}$, что делает зеленые насаждения важным средством контроля рассеивания ЗВ в городской среде [21–25].

Одно из возможных решений проблемы высоких концентраций мелкодисперсных частиц в воздухе города — озеленение крыш зданий. Данная технология широко применяется в последние десятилетия в Германии, Франции, Италии, США, Канаде, Японии и Китае. «Зеленые» крыши представляют собой многослойную конструкцию покрытия здания, состоящую из несущей части и дополнительных слоев (растительность, субстрат, фильтрующий слой, дренажный слой, изоляция, корневой барьер, гидроизоляционная мембрана) [26], обеспечивающих наличие растительности на крышах зданий, которая частично заменяет зеленые насаждения, уничтоженные при строительстве здания. Важно отметить, что в условиях высокой плотности городской застройки при невозможности выделить свободное пространство исключительным решением является реорганизация существующих покрытий зданий в покрытие по технологии «зеленая» крыша [27] при условии выполнения расчета по нагрузкам [28]. Как правило, в сложившейся застройке имеется высокая вероятность разместить неэксплуатируемые «зеленые» крыши экстенсивного типа вследствие небольшого веса дополнительных слоев «зеленой» крыши (вес дополнительных слоев составляет 80–100 кг/м² при толщине субстрата 0,03–0,15 м) на нижестоящие несущие элементы здания. Соответственно, устройство эксплуатируемых «зеленых» крыш интенсивного типа должно быть запланировано на стадии проекта (вес дополнительных слоев составляет 180–500 кг/м² при толщине субстрата 0,2–0,6 м) и в исключительных случаях может быть применено в покрытиях существующих зданий с большим запасом на допустимые нагрузки на нижестоящие несущие элементы здания [29, 30]. «Зеленые» крыши —

один из инструментов, который может смягчить негативные последствия пылевого загрязнения при обеспечении ряда таких экологических эффектов [31], как при озеленении территории на уровне земли. Среди многих преимуществ «зеленых» крыш, помимо вышеупомянутых, выделяются повышение энергоэффективности покрытия [32], увеличение срока службы кровельной мембраны и задерживание ливневых стоков.

Тем не менее, несмотря на экологические преимущества «зеленых» крыш и значительный интерес к данной технологии во всем мире, большая часть публикаций по воздействию «зеленых» крыш на воздушные загрязнители посвящена способности «зеленых» крыш улавливать такие ЗВ, как PM_{10} [33], NO_2 , O_3 , SO_2 , снижая их концентрацию в воздухе [34–36]. Так, исследователями установлено [34], что «зеленые» крыши оказывают значительное положительное влияние на окружающую среду, приводя к снижению загрязнения атмосферы на 35–100 %. Однако только на протяжении последних лет ученые пришли к необходимости углубления исследований по воздействию «зеленых» крыш именно на мелкодисперсные частицы $PM_{2,5}$.

Аналогично с другими типами озеленения городских территорий растительность на «зеленых» крышах приводит к заметному снижению $PM_{2,5}$ [37, 38]. Так, например, в работе [37] китайскими учеными в теплый период года (24.08.2014) был проведен 24-часовой эксперимент по мониторингу концентрации $PM_{2,5}$ над усложненной автоматической системой «зеленой» крыши — системой, управляемой электрическими устройствами, питающимися от солнечной энергии, с функциями сохранения дождевой воды для полива, сбора и обработки полученных данных. Результаты эксперимента показали сокращение концентрации $PM_{2,5}$ на 14,1 % над озелененной крышей в сравнении с неозелененной крышей. Однако в силу непродолжительности эксперимента, небольшой площади образцов и специфики типа растений необходимы подтверждающие результаты и дальнейшие экспериментальные исследования, чтобы подтвердить этот вывод и оценить роль площади листьев насаждений на «зеленой» крыше в удалении мелкодисперсных частиц.

Ученые провели экспериментальные исследования [38] по оценке воздействия «зеленых» крыш с пятью видами растений (*Pitosporumtobira*, *Lavandulaangustifolia*, *Lampranthusspectabilis*, *Sedumalbum* и *Sedumreflexum*) на снижение $PM_{2,5}$ в лабораторном помещении при контролируемых условиях окружающей среды. Авторы утверждают, что растительность на «зеленых» крышах может значительно снизить концентрации $PM_{2,5}$, причем *S. album* и *S. reflexum* снижают пиковую концентрацию $PM_{2,5}$ до 45,3 и 71,4 % по сравнению с пиковыми концентрациями $PM_{2,5}$ без растительности соответственно, а самые низкие значения были обнаружены для *L. Angustifolia* и *P. tobira*. Авторы отмечают, что наи-

больший потенциал к удалению $PM_{2,5}$ наблюдается у *S. album* ($29,3 \pm 8,7$ мкг/см²·ч) в связи с высокой шероховатостью листьев и краевым эффектом (листья меньшего размера обладают большим потенциалом для улавливания $PM_{2,5}$ [39–41]). В исследовании американских ученых [42] был сделан вывод, что «зеленые» крыши на высоте 26 м могут снизить $PM_{2,5}$ на величину 7–33 %. В заключении публикации были сформулированы гипотезы о том, что воздействие $PM_{2,5}$ на человека на крыше будет ниже, чем на уровне земли, растительность на «зеленых» крышах, вероятно, удалит меньше частиц вследствие вертикального градиента $PM_{2,5}$ (с увеличением высоты здания концентрация $PM_{2,5}$ постепенно снижается из-за удаления от источника).

Учеными проведено теоретическое исследование нескольких сценариев «зеленых» крыш и «зеленых» фасадов для г. Сантьяго в программе ENVI-met [43], результаты которого показали, что «зеленые» крыши на малоэтажных зданиях могут улучшить качество воздуха на пешеходном/пригородном уровне, при этом приоритетной высотой для таких целей является высота менее 10 м. Установлено, что концентрации $PM_{2,5}$ снижаются на 3,7 и 2,7 % для зданий с расположением «зеленой» крыши на высоте 5 и 10 м соответственно. Также результаты расчета в ENVI-met продемонстрировали, что совместное устройство «зеленых» крыш и «зеленых» фасадов может сократить $PM_{2,5}$ до 7,3 % в сравнении с базовым сценарием. Помимо этого, был определен оптимальный коэффициент покрытия C_r растительностью, который составляет 75 и 50 % для «зеленых» крыш на зданиях высотой 5 и 10 м соответственно. Сделан вывод о том, что следует избегать густых деревьев в уличных каньонах, поскольку деревья вызывают уменьшение циркуляции воздуха и, как следствие, приводят к увеличению концентрации $PM_{2,5}$ в атмосферном слое около поверхности земли.

Помимо вопроса эффективности «зеленых» крыш в отношении экологических преимуществ, важно отметить экономическую целесообразность данной конструкции. В исследовании [44] канадскими учеными произведена оценка экономической целесообразности внедрения технологии «зеленых» крыш при учете трех основных экологических преимуществ, которые обеспечивает «зеленая» крыша (улучшение качества воздуха, управление ливневыми стоками, экономия энергии). Ученые пришли к выводу, что наибольшая экономическая выгода была получена за счет улучшения качества воздуха, а управление ливневыми стоками и экономия энергии занимают второе и третье места соответственно. Результаты расчетов показали, что чистая приведенная стоимость «зеленых» крыш на 28–48 % меньше, чем у обычных крыш в течение всего срока эксплуатации (40 лет). Однако при 20-летнем периоде эксплуатации «зеленой» крыши проекты с ее применением являются экономически жизнеспособными при определенных условиях и ограничениях [45].

Важно отметить, что в связи с трудоемкостью процесса реализации технологии «зеленой» крыши крайне важным становится вопрос эффективного размещения «зеленых» крыш с точки зрения наибольшего их влияния на снижение $PM_{2,5}$. В данном исследовании предлагается выделить две типологии городских территорий по критерию эффективности устройства «зеленых» крыш в целях снижения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ (применительно к РФ):

1) эффективную городскую территорию, потенциально подходящую для размещения озеленения на крышах зданий;

2) неэффективную городскую территорию, не подходящую для размещения озеленения на крышах зданий.

Согласно разработанной типологии, к эффективным городским территориям относятся территории, удовлетворяющие какому-либо из следующих критериев (применительно к РФ):

- принадлежность территории к первой зоне (наиболее эффективной территории) и второй зоне (территории средней эффективности) (рис. 1);

- принадлежность территории к категории «крупные» или «крупнейшие» города с численностью населения более 250 тыс. человек в соответствии с классификацией СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» п. 4.4, табл. 4.1;

- доля озелененной территории выбранного квартала города должна составлять менее 0,4 ($S_{oz}/S_{тер}$).

К неэффективным городским территориям относятся все остальные территории, удовлетворяющие какому-либо из следующих критериев (применительно к РФ):

- принадлежность территории к третьей зоне (территории низкой эффективности) и четвертой зоне (неэффективной территории) (см. рис. 1);

- принадлежность территории к категории «малые», «средние» или «большие» города с численностью населения менее 250 тыс. человек в соответствии с классификацией СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» п. 4.4, табл. 4.1;

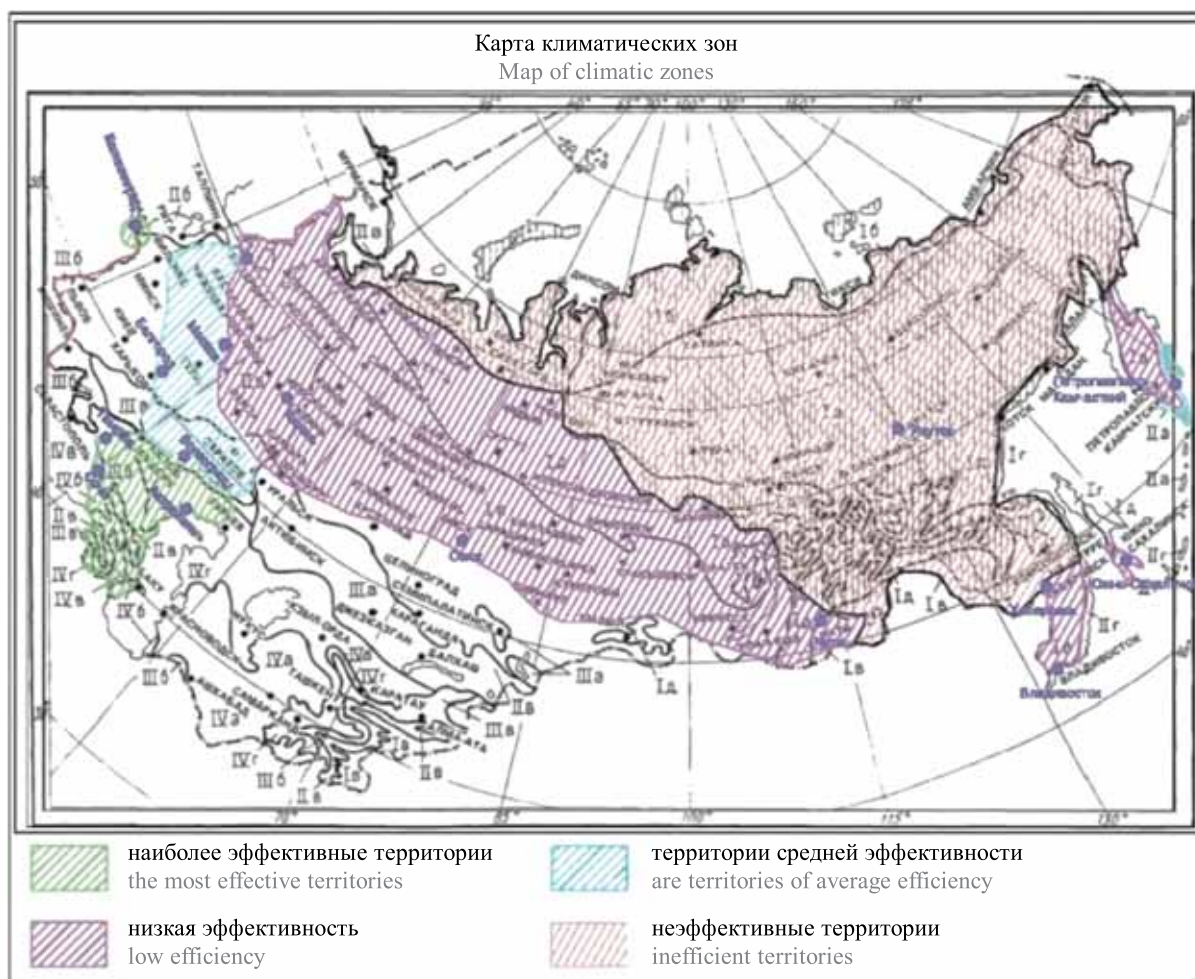


Рис. 1. Схема степени эффективности и возможности применения «зеленых» крыш для территории России [46]

Fig. 1. Scheme of the degree of effectiveness and applicability of “green” roofs for the territory of Russia [46]

• доля озелененной территории выбранного квартала города должна составлять более 0,4 ($S_{оз}/S_{тер}$).

Технология «зеленая» крыша может применяться при необходимости для неэффективных городских территорий, однако эффективность данной технологии в отношении снижения $PM_{2,5}$ может быть невысокой.

Цель данной работы — создание методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ в целях повышения экологической безопасности городской среды (применительно к РФ) в соответствии с предложенной типологией на основании разработанной математической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании была разработана математическая модель для численного расчета способности «зеленых» крыш снижать концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ в воздушной среде города. Расчетная схема модели для определения осаждения частиц представлена на рис. 2.

Уравнение турбулентной диффузии, описывающее данную модель, имеет вид:

$$\frac{v_1}{\ln(z_1/z_0)} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \frac{\partial q}{\partial x} - v_s \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + k_1 \frac{z}{z_1} \right) \frac{\partial q}{\partial z} \right] = \frac{k_1}{z_1} \frac{\partial q}{\partial z} + \left(v + k_1 \frac{z - z_0}{z_1} \right) \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где v_1 — скорость ветра на высоте z_1 , м/с; z_1 — выбранная высота над уровнем крыши, м; z_0 — шеро-

ховатость поверхности «зеленой» крыши; q — концентрация частиц $PM_{2,5}$, мкг/м³; v_s — скорость гравитационного оседания частиц $PM_{2,5}$, является постоянной величиной, можно найти по таблице; v — коэффициент молекулярной диффузии воздуха, м²/с; k_1 — коэффициент обмена, м²/с.

Данное уравнение может быть решено численными методами в программе Comsol Multiphysics в модуле General Form PDE, специально предназначенном для численного решения уравнений турбулентной диффузии. Для этого введем исходные данные в программу (табл. 1).

Табл. 1. Исходные данные для расчета в программе Comsol Multiphysics в модуле General Form PDE

Table 1. Initial data for the calculation in the program Comsol Multiphysics in the module General Form PDE

Параметры Parameters	Значения Value
z_1 , м / m	1
k_1 , м ² /с / м ² /s	0,2
z_0 , м / m	0,05
v_1 , м/с / m/s	2
v , м ² /с / м ² /s	$8,25 \cdot 10^{-5}$
q_{amb} , мкг/м ³ / μg/m ³	40
v_s , м/с / m/s	$2,7 \cdot 10^{-4}$
z , м / m	20

По результатам численного решения были составлены графики, представленные на рис. 3–5.

Как видно из рис. 4, наибольшее снижение концентрации над поверхностью «зеленой» крыши про-

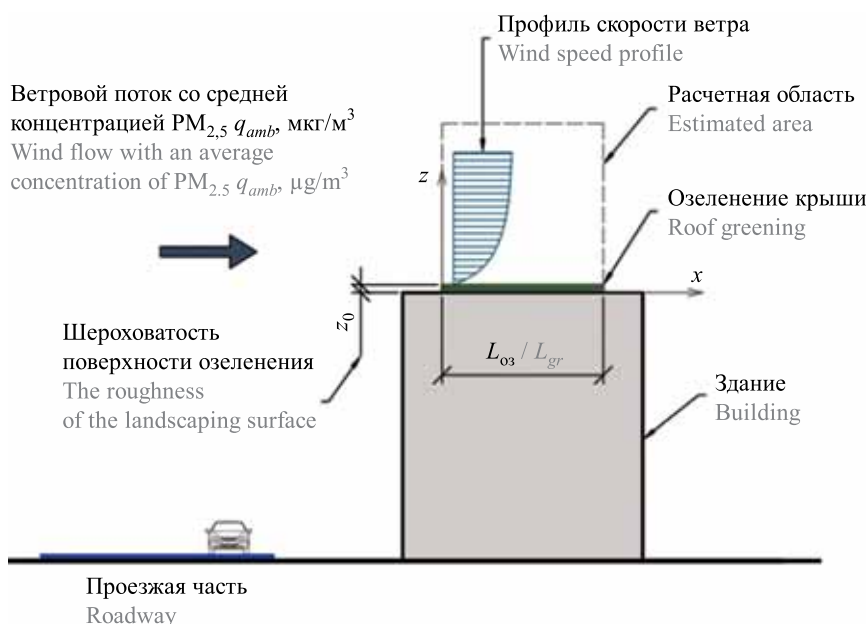


Рис. 2. Расчетная схема для численного решения

Fig. 2. Calculation scheme for the numerical solution

исходит на высоте до 2 м, выше концентрация быстро стремится к фоновому значению. Поэтому наиболее рационально озеленять крыши малоэтажных и среднеэтажных зданий или частей зданий (например, стилобаты), расположенных в непосредственной близости к источникам загрязнения (автомобильным дорогам).

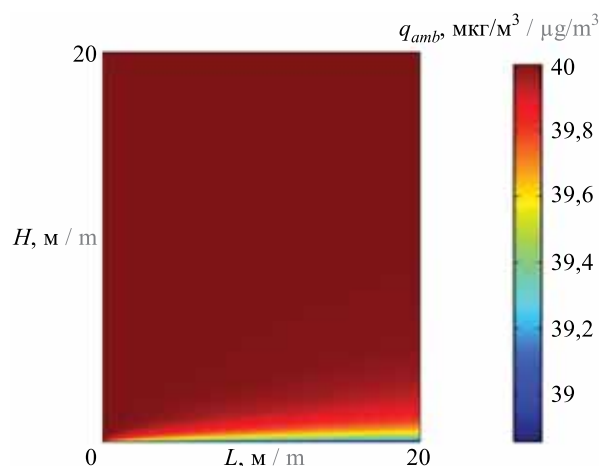


Рис. 3. Динамика изменения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ q_{amb} , $мкг/м^3$ в зависимости от высоты H , м

Fig. 3. Dynamics of $PM_{2.5}$ fine particle concentration change q_{amb} , $μg/m^3$ as a function of height H , m

Разработанная математическая модель позволяет численно оценить эффективность применения «зеленой» крыши в той или иной градостроительной ситуации. Она может использоваться для сравнения различных вариантов озеленения крыш зданий и выбора наиболее оптимального с точки зрения обеспечения экологической безопасности.

Далее на основании разработанной математической модели был разработан алгоритм методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в целях повышения экологической безопасности городской среды (применительно к РФ). Данный алгоритм представляет собой последовательность 29 действий, осуществление которых приведет к получению вывода о том, стоит ли озеленять существующую крышу здания, и будет ли это эффективно с точки зрения снижения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в воздушной среде. Выполнение действий сопряжено с осуществлением расчета в соответствии с математической моделью, указанной выше, что позволяет получить достоверные данные. Окончательным численным результатом данной методики будет являться осредненное за летний период суточное накопление пыли на поверхности «зеленой» крыши в граммах M_{0r} . Чем больше значение M_{0r} , тем более эффективно устройство «зеленой» крыши в данном месте с точки зрения повышения экологической безопасности города.

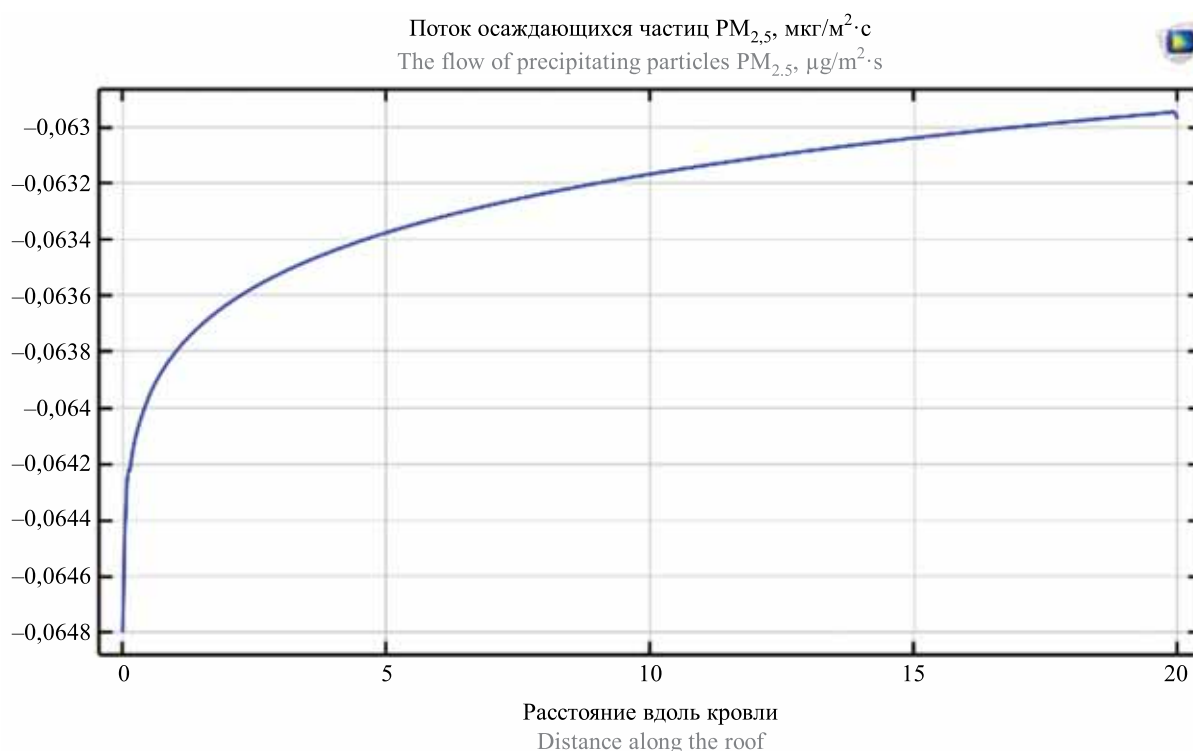


Рис. 4. Поток осаждающихся мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в зависимости от расстояния вдоль «зеленой» крыши

Fig. 4. Flow of $PM_{2.5}$ precipitating fine particles as a function of distance along the «green» roof

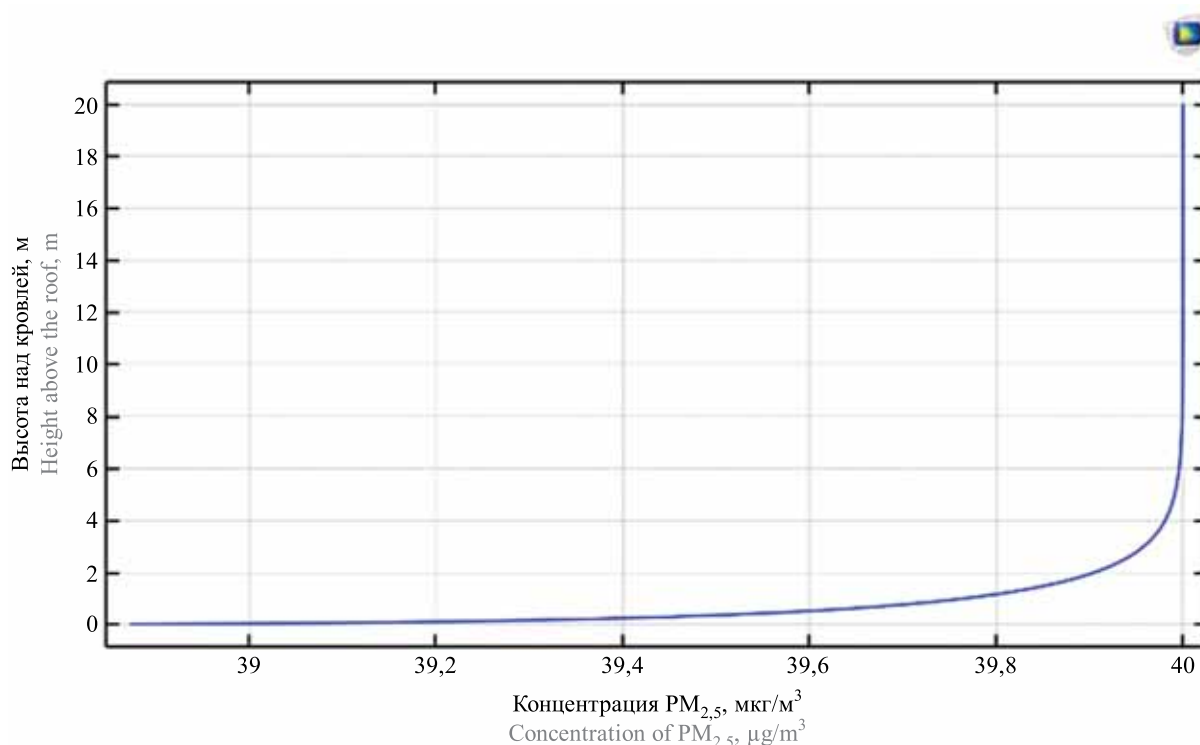


Рис. 5. Профиль концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ по высоте на краю «зеленой» крыши, находящийся с противоположной стороны от дороги

Fig. 5. $PM_{2,5}$ fine particles concentration profile by height at the edge of the “green” roof on the opposite side of the road

Алгоритм методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$

1. Начало алгоритма.
2. Введите название города, в котором планируется устройство «зеленой» крыши.
3. Программой определяется принадлежность города к одному из четырех районов (см. рис. 1).
4. Если город принадлежит к третьему или четвертому району, то применение «зеленой» крыши считается неэффективным, в противном случае продолжить выполнение алгоритма.
5. Укажите численность населения города, тыс. чел.
6. Если численность населения города превышает 250 тыс. чел., то осуществляется переход к сле-

дующему шагу, в противном случае применение «зеленой» крыши считается неэффективным.

Примечание: крупные и крупнейшие города (в соответствии с классификацией СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» п. 4.4, табл. 4.1) с численностью населения более 250 тыс. человек считаются подходящими для устройства «зеленых» крыш, поскольку им свойственны большие инфраструктурные изменения и развитая автотранспортная система.

7. Введите площадь озеленения выбранного квартала города ($S_{оз}$, га) и площадь всей территории выбранного квартала города ($S_{тер}$, га). Программой определяется доля озелененной территории выбранного квартала города по формуле: $S_{оз}/S_{тер}$.

8. Если доля озелененной территории выбранного квартала города меньше 0,4, то осуществляется

Табл. 2. Форма предоставления данных о ветровом режиме территории

Table 2. Form for the provision of data on the wind conditions of the territory

Направление ветра Wind direction	Повторяемость p , % Repeatability p , %	Средняя скорость v , м/с Average speed v , m/s	Направление ветра Wind direction	Повторяемость p , % Repeatability p , %	Средняя скорость v , м/с Average speed v , m/s
Ю / S	$p_{Ю} / p_S$	$v_{Ю} / v_S$	С / N	p_C / p_N	v_C / v_N
ЮВ / SE	$p_{ЮВ} / p_{SE}$	$v_{ЮВ} / v_{SE}$	СЗ / NW	$p_{СЗ} / p_{NW}$	$v_{СЗ} / v_{NW}$
В / E	p_B / p_E	v_B / v_E	З / W	p_3 / p_W	v_3 / v_W
СВ / NE	$p_{СВ} / p_{NE}$	$v_{СВ} / v_{NE}$	ЮЗ / SW	$p_{ЮЗ} / p_{SW}$	$v_{ЮЗ} / v_{SW}$

переход к следующему шагу, в противном случае применение «зеленой» крыши считается неэффективным.

Примечание: согласно п. 9.12 СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» доля озелененной территории в застройке должна быть не менее 40 %.

9. Введите метеорологические данные по ветровому режиму территории (повторяемость ветра p , %; средняя скорость ветра v , м/с) для летних месяцев в соответствии с табл. 2.

10. Введите значение фоновой концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$, характерной для рассматриваемого района города C_{amb} , мкг/м³.

Примечание: в качестве фоновой концентрации служит среднесуточная концентрация мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$, определенная по данным метеостанции, расположенной вблизи рассматриваемого городского квартала.

11. Введите данные по транспортным магистралям, ограничивающим выбранный квартал города, согласно табл. 3.

12. Для каждой транспортной магистрали программой рассчитывается суточное количество ТС типа m для j -й дороги (N_{jm} , шт.) в соответствии с табл. 4.

Примечание: типы ТС делятся на:

- 1) легковые автомобили ($m = 1$);
- 2) грузовые автомобили небольшой грузоподъемности ($m = 2$);

3) грузовые автомобили большой грузоподъемности ($m = 3$);

4) автобусы ($m = 4$).

В таблице принято соотношение типов ТС, проезжающих в сутки. При наличии более актуальных данных необходимо их ввести в таблицу вместо имеющихся, расчет производится в соответствии с данными, введенными в таблицу.

13. Программой для каждой транспортной магистрали определяется среднесуточная интенсивность выбросов $PM_{2,5}$, мкг/(м·с), по формуле:

$$q_j = 3,6 \cdot 10^{-6} \sum_{m=1}^4 P_m \frac{N_{jm}}{24}, \quad (2)$$

где P_m — интенсивность выбросов частиц $PM_{2,5}$ транспортными средствами типа m , мкг/(км·шт.) (табл. 5); N_{jm} — суточное количество ТС типа m для j -й дороги, шт.

14. Для каждого здания, потенциально подходящего для устройства «зеленой» крыши, на территории выбранного квартала введите данные в соответствии с табл. 6.

Примечание: зданиями, потенциально подходящими для устройства «зеленых» крыш, считаются здания, удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) здания с плоской крышей;
- 2) здания, расположенные на первой линии застройки от ограничивающих квартал дорожных магистралей;
- 3) здания с высотой ≤ 30 м;
- 4) не промышленные здания.

Табл. 3. Данные по транспортным магистралям, ограничивающим выбранный квартал города

Table 3. Data on traffic arteries bounding the selected city block

Номер дороги j Road number j	Название транспортной магистрали Name of the transport highway	Суточное количество транспортных средств (ТС) всех типов для j -й дороги N_j , шт. The daily number of vehicles (TS) of all types for the j -th road N_j , pcs
1	...	N_1
2	...	N_2
3	...	N_3
4	...	N_4

Табл. 4. Суточное количество транспортных средств типа m для j -й дороги

Table 4. Daily number of vehicles of type m for the j -th road

Номер дороги j Road number j	Суточное количество легковых автомобилей N_{j1} , шт. Daily number of passenger cars N_{j1} , pcs	Суточное количество грузовых автомобилей небольшой грузоподъемности N_{j2} , шт. Daily number of small trucks N_{j2} , pcs	Суточное количество грузовых автомобилей большой грузоподъемности N_{j3} , шт. Daily number of heavy trucks N_{j3} , pcs	Суточное количество автобусов N_{j4} , шт. Daily number of buses N_{j4} , pcs
1	$0,88 \cdot N_1$	$0,05 \cdot N_1$	$0,03 \cdot N_1$	$0,04 \cdot N_1$
2	$0,88 \cdot N_2$	$0,05 \cdot N_2$	$0,03 \cdot N_2$	$0,04 \cdot N_2$
3	$0,88 \cdot N_3$	$0,05 \cdot N_3$	$0,03 \cdot N_3$	$0,04 \cdot N_3$
4	$0,88 \cdot N_4$	$0,05 \cdot N_4$	$0,03 \cdot N_4$	$0,04 \cdot N_4$

Табл. 5. Интенсивность выбросов частиц $PM_{2.5}$ транспортными средствами типа m Table 5. $PM_{2.5}$ particle emission intensity by m -vehicles

Тип транспортных средств m Type of vehicles m	Описание группы Description of the group	Интенсивность испускания $PM_{2.5}$ одним транспортным средством P_m , мкг/(км·шт.) Intensity of emission of $PM_{2.5}$ by one vehicle P_m , $\mu g/(km \cdot pcs)$
1	Грузовые автомобили небольшой грузоподъемности Small-capacity trucks	15 ± 5
2	Грузовые автомобили большой грузоподъемности Heavy-duty trucks	125 ± 45
3	Легковые автомобили Passenger cars	10 ± 5
4	Автобусы The buses	105 ± 35

Табл. 6. Форма предоставления данных о зданиях

Table 6. Building data submission form

Номер здания r Building number r	Адрес Address	Высота h_r , м Height h_r , m
1	...	h_1
2	...	h_2
3	...	h_3
...	...	...
$N_{зд} / N_{bld}$	...	$h_{N_{зд}} / h_{Nbld}$

Для определения требуемых параметров застройки может быть удобно использовать схему выбранного квартала города, пример которой показан на рис. 6. На нем подходящие для озеленения крыши зданий выделены оранжевым цветом, показаны расстояния от края дороги до фасада здания для каждого из выбранных зданий.

15. Начало цикла 1. Для всех направлений ветра (см. табл. 2) выполните действия 16–27.

16. Для каждого из выбранных зданий определите интенсивность выбросов с наветренной транспортной магистрали $q_{здr}$, мкг/(м·с), которая соответствует этому зданию (см. шаг 13).

Примечание: за величину $q_{здr}$ принимается интенсивность выбросов с транспортной магистрали, находящейся перед зданием с наветренной стороны. В случае если находящаяся перед зданием транспортная магистраль расположена с подветренной относительно здания стороны, $q_{зд}$ для этого здания принимается равным 0. Так, на рис. 2 видно, что перед зданиями 1–3 с наветренной стороны располагается дорога 2, поэтому $q_{зд1} = q_{зд2} = q_{зд3} = q_2$, перед зданиями 4–6 с наветренной стороны располагается дорога 1, поэтому $q_{зд4} = q_{зд5} = q_{зд6} = q_1$. Расположенные перед зданиями 7 и 8 дороги находятся с подветренной стороны, поэтому $q_{зд7} = q_{зд8} = 0$.

17. Для каждого из выбранных зданий введите расстояние от центра его фасада до края проезжей

части, соответствующей зданию наветренной транспортной магистрали c_r , м (см. рис. 6).

18. Начало цикла 2. Для каждого из выбранных зданий выполните действия 19–28.

19. Введите значения: угол между направлением ветра и осью наветренной транспортной магистрали (φ , градусы) и долю солнечных дней за 3 летних месяца. Программой определяется ожидаемая концентрация $PM_{2.5}$ вблизи фасада здания над землей (C_{0r} , мкг/м³). Для расчета величины предлагается использовать гауссовскую модель рассеивания ЗВ в атмосфере на небольших высотах. Тогда величина C_{0r} будет определяться по следующей формуле:

$$C_{0r} = \frac{2q_{здr}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma v \cdot \sin \varphi} + C_{amb}, \quad (3)$$

где $q_{здr}$ — интенсивность выбросов с наветренной транспортной магистрали, соответствующей зданию r , мкг/(м·с) (см. шаг 16); σ — стандартное отклонение гауссовского рассеивания в вертикальном направлении, м (зависит от расстояния между рассматриваемым зданием и дорогой c_r и определяется методом интерполяции по табл. 7); v — средняя скорость ветра, для которой ведется расчет (см. шаг 9), м/с; φ — угол между направлением ветра и осью наветренной транспортной магистрали (см. рис. 6); C_{amb} — фоновая концентрация частиц $PM_{2.5}$ (см. шаг 10), мкг/м³.

20. Программой определяется скорость ветра на уровне 5 м над поверхностью крыши здания v_{kr} . Скорость ветра находится по формуле:

$$v_{kr} = v \sqrt{k_{10} \left(\frac{h_r + 5}{10} \right)^\beta}, \quad (4)$$

где h_r — высота здания над поверхностью земли, м; k_{10} и β — коэффициенты, которые определяются по табл. 11.3 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в зависимости от типа местности ($k_{10} = 0,4$ и $\beta = 0,25$).

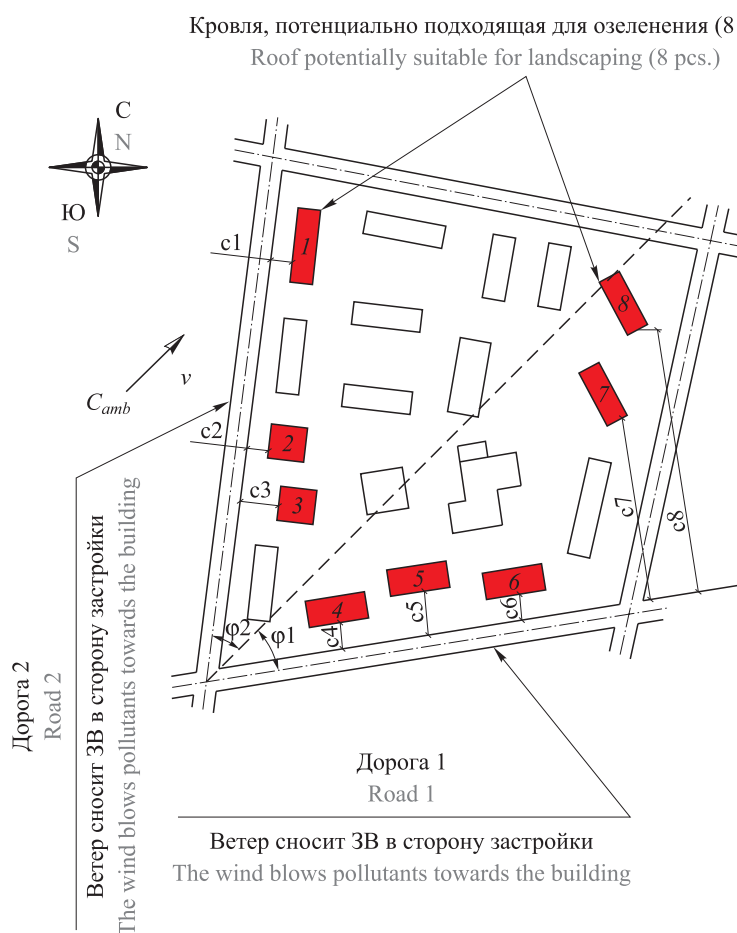


Рис. 6. К 11-му шагу методики

Fig. 6. By step 11 of the methodology

Табл. 7. Стандартное отклонение гауссовского рассеивания, м

Table 7. Standard deviation of Gaussian dispersion, m

Приходящая солнечная радиация Incoming solar radiation	Удаление от края проезжей части, м Distance from the edge of the roadway, m					
	10	20	40	60	80	100
Сильная Strong	2	4	6	8	10	13
Слабая Weak	1	2	4	6	8	10

Примечание: если доля солнечных дней за летние 3 месяца составляет больше 50 %, то выбирается первая строка, если меньше или равно, то вторая строка.

21. Программой определяется концентрация частиц $PM_{2,5}$ на отметке крыши здания C_{kr} по формуле:

$$C_{kr} = (C_{0r} - C_{amb})e^{-\frac{h_r^2}{200}} + C_{amb}. \quad (5)$$

Примечание: концентрация C_{kr} рассчитывается по формуле, которая была получена при анализе результатов расчета в ENVI-met и которая отражает характер рассеивания частиц $PM_{2,5}$ по высоте (см. рис. 7). График $C(h)$ подобен

половине гауссовой функции (именно на этом сходстве основаны гауссовы модели рассеивания 3В).

Функция $C(h)$ записывается в виде:

$$C(h) = ae^{-\frac{(h-b)^2}{2c^2}} + C_{amb}, \quad (6)$$

где a , b , c — коэффициенты, которые равны: $b = 0$, a и c можно найти из условий $C(0) = C_0$, $C(30) - C_{amb} = e^{-4,5}(C_0 - C_{amb})$ (т.е. расстояние 30 м будет соот-

ветствовать расстоянию 3σ для нормального распределения, при котором гауссова функция очень близко подходит к оси абсцисс): $a = C_0 - C_{amb}$;

$$c = \frac{30}{\sqrt{-2 \ln(e^{-4,5})}} = 10.$$

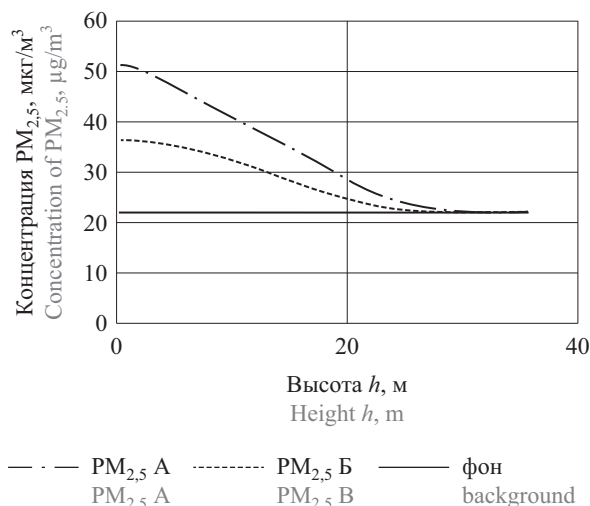


Рис. 7. К определению предельной высоты влияния дороги на концентрацию $PM_{2,5}$

Fig. 7. To determine the limiting height of the effect of the road on the concentration of $PM_{2,5}$

22. Введите значения L_r, B_{1r}, B_{2r} .

Примечание: значения L_r, B_{1r}, B_{2r} определяются путем проведения через углы зданий линий, параллельных направлению ветра (см. рис. 8).

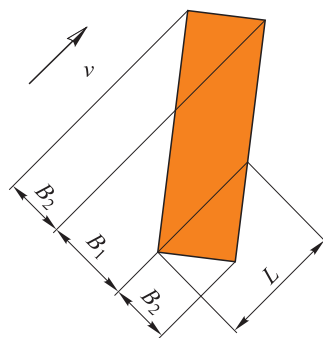


Рис. 8. Схема определения параметров L_r, B_{1r}, B_{2r}

Fig. 8. Parameter determination scheme L_r, B_{1r}, B_{2r}

23. Введите индекс плотности площади листьев для каждого здания r с озелененной крышей ($LAI_r, m^2/m^2$). Для экстенсивной «зеленой» крыши $LAI_r = 2 m^2/m^2$.

24. Осуществляется расчет на основе описанной ранее модели Comsol Multiphysics (General Form PDE) при помощи пользовательского приложения. Результатами расчета являются значения: удельной интенсивности поглощения частиц $PM_{2,5}$ поверхностью кровельного озеленения $I_{1r}^{уд}$ и $I_{2r}^{уд}$, $мкг/(м \cdot с)$ для

двух участков крыши (углового и центрального — см. рис. 8).

25. Программой определяется общее количество частиц $PM_{2,5}$ (в граммах), которое осядет на «зеленой» крыше на здании r за 24 часа при i -м направлении ветра по формуле:

$$M_{ir} = 0,0864(I_{1r}^{уд}B_{1r} + 2I_{ir}^{уд}B_{2r}), \quad (7)$$

где 0,0864 — значение, полученное при переводе $мкг/с$ в $мкг/24 ч$.

26. Конец цикла 2.

27. Конец цикла 1.

28. Программой выводятся результаты расчета в виде, показанном в табл. 8. Значения в табл. 8 даны для примера.

Табл. 8. Пример оформления результатов расчета для всех направлений ветра

Table 8. Example of calculation results for all wind directions

Номер здания r Building number r	M_{ir} г / g				Итоговое M_{0r} , г Total M_{0r} , g
	при параметрах ветра: with wind parameters:				
	p_1, v_1	p_2, v_2	...	p_8, v_8	
1	6,8	3,4	...	0,3	
2	5,1	0,5		0,2	
3	3,4	0,8		0,1	
4	5,4	0,6		3,2	
5	6,4	0,7		2,6	
6	2,3	0,4		5,2	
7	0,8	7,2		3,7	
8	0,3	3,5		4,8	

Примечание: итоговое значение M_{0r} , учитывающее изменчивость ветрового режима на территории застройки, для каждого здания рассчитывается по формуле:

$$M_{0r} = \sum_{i=1}^n M_{ir} \frac{p_i}{100}. \quad (8)$$

Например, для 1-го здания в табл. 7:

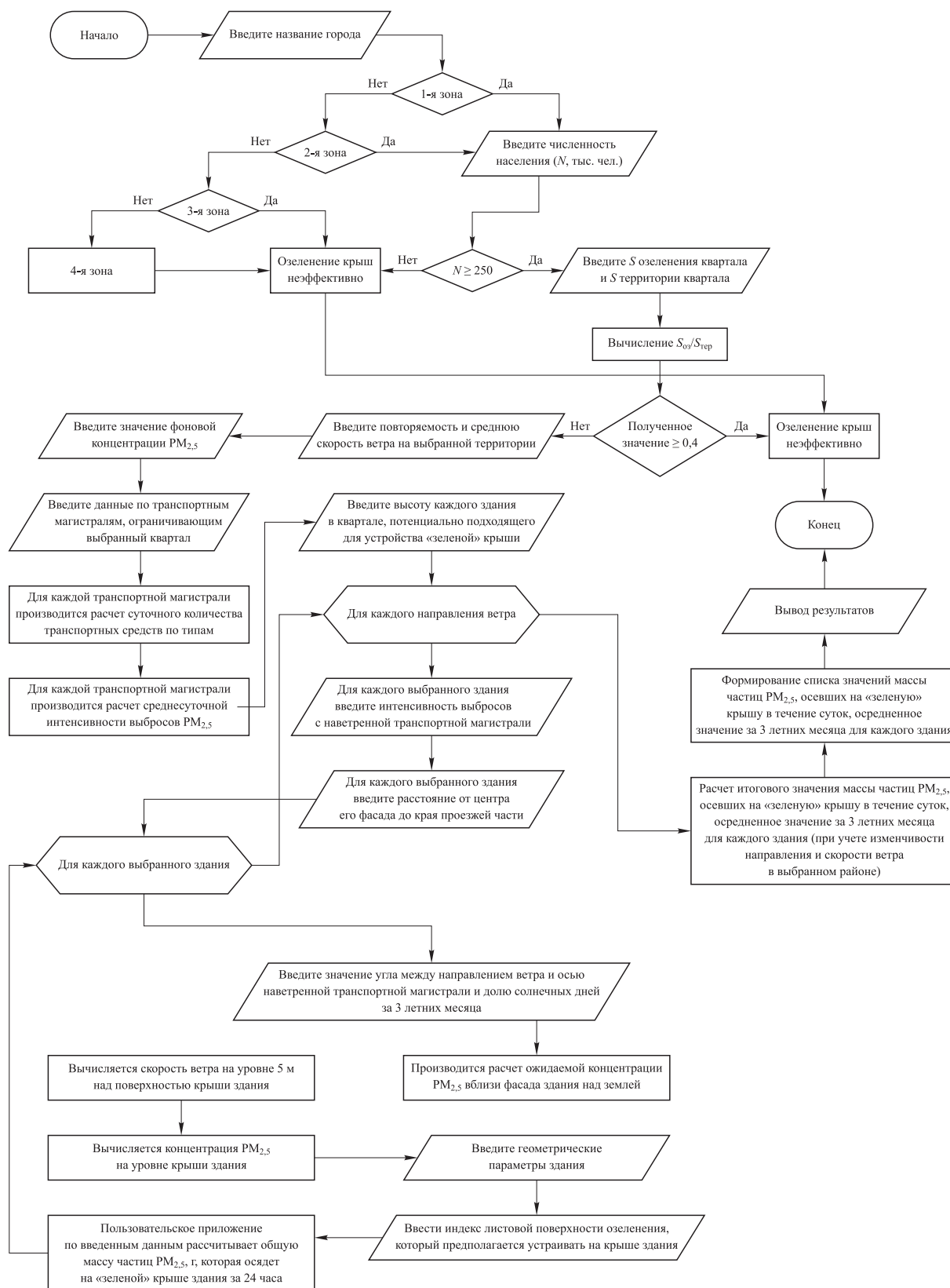
$$M_{01} = 6,8 \cdot \frac{p_1}{100} + 3,4 \cdot \frac{p_2}{100} + \dots + 0,3 \cdot \frac{p_8}{100}.$$

29. Программой формируется список зданий по убыванию величины M_{0r} . В начале полученного списка будут стоять здания, устройство «зеленой» крыши на которых имеет наибольший приоритет для выбранного квартала.

Примечание: значение M_{0r} отражает осредненное за летний период времени суточное накопление пыли на поверхности «зеленой» крыши в граммах. Чем больше это значение, тем более эффективно устройство «зеленой» крыши в данном месте с точки зрения обеспечения экологической безопасности города.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам исследования составлена блок-схема алгоритма методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ (рис. 9).



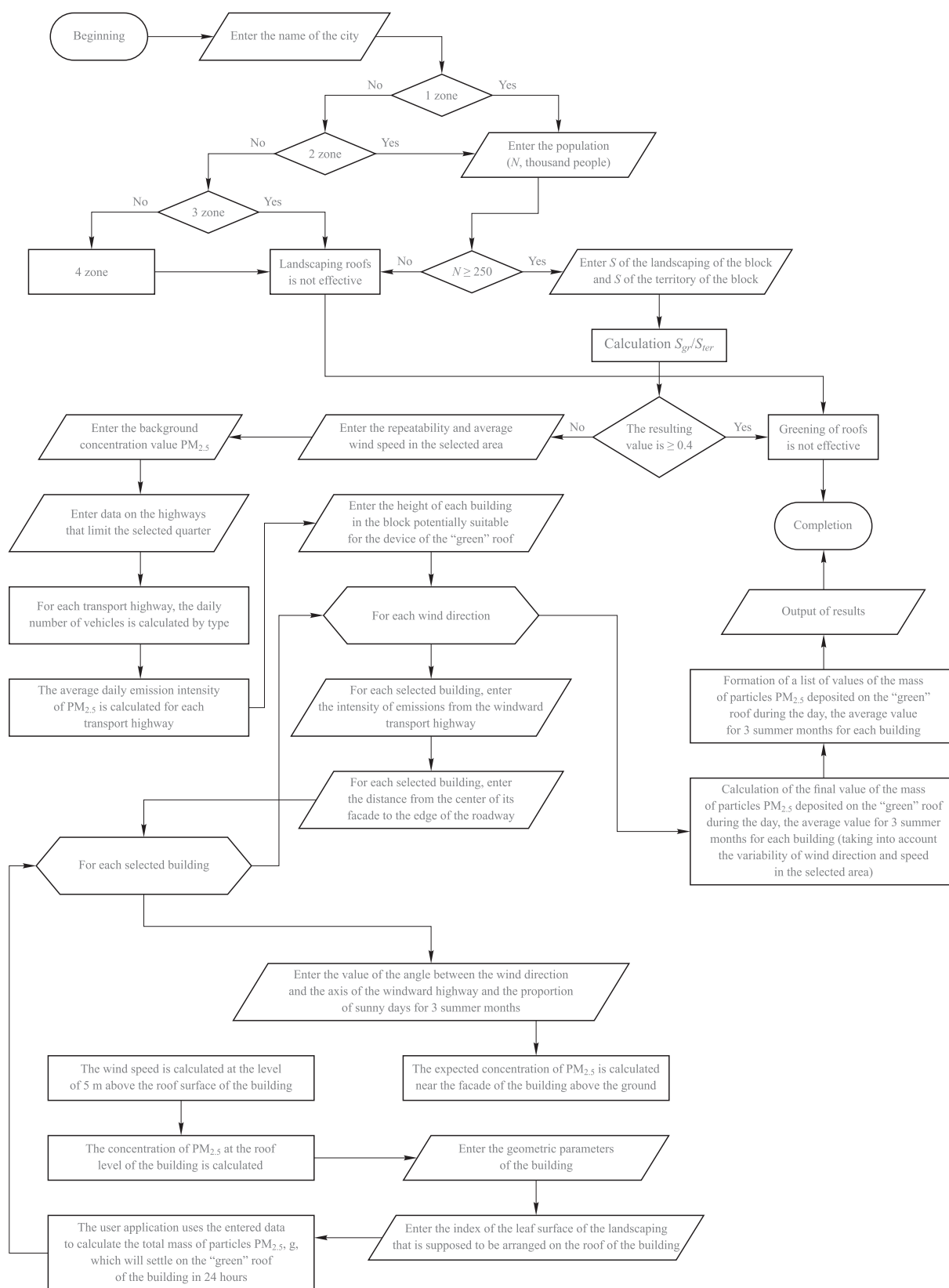


Рис. 9. Блок-схема алгоритма методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$

Fig. 9. Block diagram of the algorithm of the methodology for substantiating the effectiveness of "green" roofs to reduce fine particulate matter $PM_{2.5}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема качества воздуха становится приоритетной для поддержания здоровья и благополучия городского населения в контексте роста городов и технологического развития. Анализ практического и теоретического опыта показывает значительное влияние озеленения городских территорий, в том числе озеленения крыш зданий, на снижение запыленности городской среды мелкодисперсными частицами $PM_{2.5}$. Размещение необходимого уровня озеленения на территории города является важной задачей для обеспечения экологической безопасности. Следует принимать такие управленческие решения, которые были бы направлены на устойчивое развитие городских территорий с точки зрения экологических преимуществ, которые могут быть обеспечены увеличением площади озелененных территорий в целях повышения экологической безопасности городской среды. Однако в существующих методах и методиках расчета рассеивания мелкодисперсных частиц озеленение территории в полной мере не учитывается при планировании городской среды и оценке степени ее экологической безопасности.

Разработанная математическая модель, которая позволяет численно оценить эффективность применения «зеленой» крыши при различных градостроительных сценариях, может быть использована для сравнения различных вариантов озеленения на этапе проектирования и выбора наиболее оптимального из них с точки зрения обеспечения экологической безопасности (для которого при прочих равных условиях суммарное осаждение частиц $PM_{2.5}$ на поверхностях озеленения будет наибольшим). При этом разработанная модель рассматривает только ту часть воздушного потока, которая контактирует с озеленяемой поверхностью, что делает ее значительно проще в использовании по сравнению с моделями, опи-

сывающими движение воздушной среды во всем объеме городской среды.

На основании разработанной математической модели был разработан алгоритм методики обоснования эффективности устройства «зеленых» крыш для снижения мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в целях повышения экологической безопасности городской среды (применительно к РФ). Данный алгоритм представляет собой последовательность 29 действий, осуществление которых приведет к получению вывода о том, стоит ли озеленять существующую крышу здания, и будет ли это эффективно с точки зрения снижения концентрации мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в воздушной среде. Выполнение действий сопряжено с осуществлением расчета в соответствии с математической моделью, указанной выше, что дает возможность получить достоверные данные. Окончательным численным результатом данной методики будет являться осредненное за летний период суточное накопление пыли на поверхности «зеленой» крыши в граммах M_{0r} . Чем больше значение M_{0r} , тем более эффективно устройство «зеленой» крыши в данном месте с точки зрения повышения экологической безопасности города.

Разработанная методика имеет практическую значимость и может быть использована при различных градостроительных сценариях, когда требуется численно оценить эффективность применения «зеленой» крыши на том или ином здании, что выполняется на этапе проектирования путем сопоставления различных вариантов размещения «зеленых» крыш и выбора наиболее оптимального из них (для которого при прочих равных условиях осредненное за летний период времени суточное накопление пыли $PM_{2.5}$ на поверхности «зеленой» крыши в граммах будет наибольшим) с точки зрения обеспечения экологической безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Southerland V.A., Brauer M., Mohegh A., Hammer M.S., van Donkelaar A., Martin R.V. et al. Global urban temporal trends in fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and attributable health burdens: estimates from global datasets // *The Lancet Planetary Health*. 2022. Vol. 6. Issue 2. Pp. e139–e146. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00350-8
2. Sahoo M., Sethi N. The dynamic impact of urbanization, structural transformation, and technological innovation on ecological footprint and $PM_{2.5}$: evidence from newly industrialized countries // *Environment, Development and Sustainability*. 2022. Vol. 24. Issue 3. Pp. 4244–4277. DOI: 10.1007/s10668-021-01614-7
3. Bakaeva N., Le M.T. Determination of urban pollution islands by using remote sensing technology in Moscow, Russia // *Ecological informatics*. 2022. Vol. 67. P. 101493. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101493.
4. Графкина М.В., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Николенко Д.А. К вопросу контроля и нормирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферный воздух при движении автомобильного транспорта // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 373–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380
5. McDuffie E.E., Martin R.V., Spadaro J.V., Burnett R., Smith S.J., O'Rourke P. et al. Source sector and fuel contributions to ambient $PM_{2.5}$ and attributable mortality across multiple spatial scales // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-021-23853-y
6. Xi Y., Richardson D.B., Kshirsagar A.V., Wade T.J., Flythe J.E., Whitsel E.A. et al. Effects of

short-term ambient PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U.S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study // *Environmental Health*. 2022. Vol. 21. Issue 1. DOI: 10.1186/s12940-022-00836-0

7. Alexeeff S.E., Liao N.S., Liu X., Van Den Eeden S.K., Sidney S. Long-term PM_{2.5} exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: review and meta-analysis // *Journal of the American Heart Association*. 2021. Vol. 10. Issue 1. P. e016890. DOI: 10.1161/JAHA.120.016890.

8. Meo S.A., Ahmed Alqahtani S., Saad binmeather F., Abdulrhman AlRasheed R., Mohammed Aljedaie G., Mohammed Albarrak R. Effect of environmental pollutants PM_{2.5}, CO, O₃ and NO₂, on the incidence and mortality of SARS-COV-2 in largest metropolitan cities, Delhi, Mumbai and Kolkata, India // *Journal of King Saud University — Science*. 2022. Vol. 34. Issue 1. P. 101687. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101687

9. Wen J., Chuai X., Gao R., Pang B. Regional interaction of lung cancer incidence influenced by PM_{2.5} in China // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 803. P. 149979. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149979

10. Cristaldi A., Fiore M., Conti G.O., Pulvirenti E., Favara C., Grasso A. et al. Possible association between PM_{2.5} and neurodegenerative diseases: A systematic review // *Environmental Research*. 2022. Vol. 208. P. 112581. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112581

11. Chowdhury S., Pozzer A., Haines A., Klingmüller K., Münzel T., Paasonen P. et al. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols // *Environment International*. 2022. Vol. 159. P. 107020. DOI: 10.1016/j.envint.2021.107020

12. Wang Y., Xiao S., Zhang Y., Chang H., Martin R.V., Van Donkelaar A. et al. Long-term exposure to PM_{2.5} major components and mortality in the southeastern United States // *Environment International*. 2022. Vol. 158. P. 106969. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106969

13. Борисов М.В., Бакаева Н.В., Черняева И.В. Нормативно-техническое регулирование в области озеленения городской среды // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 2. С. 212–222. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.212-222

14. Ле М.Т., Гельманова М.О., Шукуров И.С., Слесарев М.Ю., Нгуен В.М. Исследование влияния озеленения Ханоя на эффект городского острова тепла // *Биосферная совместимость: человек, регион и технологии*. 2021. Т. 1 (33). С. 35–50. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-35-50.

15. Zhang L., He J., Gong S., Guo X., Zhao T., Zhou C. et al. Effect of vegetation seasonal cycle alterations to aerosol dry deposition on PM_{2.5} concentrations in China // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 828. No. 154211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154211

16. Yang Y.-L., Yang K., Luo Y., Yu Z.-Y., Meng C., Li C. Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's eight major economic regions from 1998 to 2016 // *Environmental Science*. 2021. Vol. 42. Issue 11. Pp. 5100–5108. DOI: 10.13227/j.hjks.202101277

17. Wroblewska K., Jeong B.R. Effectiveness of plants and green infrastructure utilization in ambient particulate matter removal // *Environmental Sciences Europe*. 2021. Vol. 33. No. 110. DOI: 10.1186/s12302-021-00547-2

18. Bi S., Dai F., Chen M., Xu S. A new framework for analysis of the morphological spatial patterns of urban green space to reduce PM_{2.5} pollution: A case study in Wuhan, China // *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 82. P. 103900. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103900

19. Chen M., Dai F., Yang B., Zhu S. Effects of neighborhood green space on PM_{2.5} mitigation: Evidence from five megacities in China // *Building and Environment*. 2019. Vol. 156. Pp. 33–45. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.03.007

20. Baraldi R., Neri L., Costa F., Facini O., Rapparini F., Carriero G. Ecophysiological and micromorphological characterization of green roof vegetation for urban mitigation // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. Vol. 37. Pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.03.002

21. Abhijith K.V., Kumar P., Gallagher J., McNabola A. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments — A review // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 162. Pp. 71–86. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

22. Eniolu T.M., Fat Y.L., Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 182. Pp. 595–605. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077

23. Feng H., Ding Y., Zou B., Cohen J.B., Ye S., Yang Z. et al. Vegetation-related dry deposition of global PM_{2.5} from satellite observations // *Journal of Geographical Sciences*. 2022. Vol. 32. Pp. 589–604. DOI: 10.1007/s11442-022-1962-0

24. Xie C., Guo J., Yan L., Jiang R., Liang A., Che S. The influence of plant morphological structure characteristics on PM_{2.5} retention of leaves under different wind speeds // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022. P. 127556. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127556

25. Chen M., Dai F., Zhu S. Effects of spatial forms of green infrastructure in block scale on PM₁₀ and PM_{2.5} removal — a case study of the main city of Wuhan // *Landscape research record*. 2018. Vol. 7. Pp. 134–142.

26. Cascone S. Green roof design: State of the art on technology and materials // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 11. P. 3020. DOI: 10.3390/su11113020

27. Liu H., Kong F., Yin H., Middel A., Zheng X., Huang J. et al. Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review //

Building and Environment. 2021. Vol. 196. P. 107794. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107794

28. Cascone S., Catania F., Gagliano A., Sciuto G. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings // Building and Environment. 2018. Vol. 136. Pp. 227–239. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.052

29. Гельманова М.О. Методика физико-технических исследований «зеленой кровли» // Дни студенческой науки. 2018. С. 1354–1356.

30. Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Исследование зеленой кровли в покрытиях зданий общественного назначения // Строительство и реконструкция. 2018. № 2. С. 105–112.

31. Shafique M., Kim R., Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges — A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. Pp. 757–773. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.006

32. Sysoeva E., Gelmanova M. Theoretical Study of “Green Roof” Energy Efficiency // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Pp. 186–198. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_18

33. Speak A.F., Rothwell J.J., Lindley S.J., Smith C.L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 61. Pp. 283–293. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.07.043

34. Rasul M.G., Arutla L.K.R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment // Energy Reports. 2019. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.09.015

35. Currie B.A., Bass B. Estimate of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model // Urban Ecosystems. 2008. Vol. 11. Pp. 409–422. DOI: 10.1007/s11252-008-0054-y

36. Jun Yang J., Yu Q., Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago // Atmospheric Environment. 2008. Vol. 42. Pp. 7266–7273. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.003

37. Luo H., Wang N., Chen J., Ye X., Sun Y. Study on the Thermal Effects and Air Quality Improvement of Green Roof // Sustainability. 2015. Vol. 7. Issue 3. Pp. 2804–2817. DOI: 10.3390/su7032804

38. Viecco M., Vera S., Jorquera H., Bustamante W., Gironás J., Dobbs C. et al. Potential of particle matter

dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 7. P. 2431. DOI: 10.3390/su10072431

39. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa “Beaupré”, Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment // Environmental Pollution. 2005. Vol. 133. Pp. 157–167. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.03.031

40. Leonard R.J., McArthur C., Hochuli D.F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations // Urban Forestry & Urban Greening. 2016. Vol. 20. Pp. 249–253. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.09.008

41. Weerakkody U., Dover J.W., Mitchell P., Reiling K. Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves // Urban Forestry & Urban Greening. 2018. Vol. 30. Pp. 98–107. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.01.001

42. Tong Z., Whitlow T.H., Landers A., Flanner B. A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm // Environmental Pollution. 2016. Vol. 208. Pp. 256–260. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.006

43. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter // Building and Environment. 2021. Vol. 204. P. 108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120

44. Niu H., Clark C., Connelly M., Busiek B., Adriaens P. Quantitative assessment of green roof benefits for Vancouver // Cities Alive 8th annual green roof wall conference. 2010.

45. Shin E., Kim H. Benefit-cost analysis of green roof initiative projects: The case of Jung-gu, Seoul // Sustainability. 2019. Vol. 11. Issue 12. P. 3319. DOI: 10.3390/su11123319

46. Сысоева Е.В., Москвитина Л.В. Эффективность применения «зеленых» крыш на территории России // Инновации и инвестиции. 2021. № 10. С. 251–259. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-123

Поступила в редакцию 30 августа 2022 г.

Принята в доработанном виде 1 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 1 сентября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ResearcherID: AFJ-9050-2022, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Маргарита Олеговна Гельманова — аспирант кафедры проектирования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8462-8299, ORCID: 0000-0003-2232-5239; margo.gelmanova@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.

Вклад авторов:

Сысоева Е.В. — научное руководство, научное редактирование текста статьи, итоговых результатов и выводов.

Гельманова М.О. — сбор и обработка материала, написание исходного текста и его доработка в соответствии с предоставленными корректировками, формирование результатов и выводов.

Слесарев М.Ю. — научное консультирование, научное редактирование текста и выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Southerland V.A., Brauer M., Moheg A., Hammer M.S., van Donkelaar A., Martin R.V. et al. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*. 2022; 6(2):e139-e146. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00350-8
2. Sahoo M., Sethi N. The dynamic impact of urbanization, structural transformation, and technological innovation on ecological footprint and PM_{2.5}: evidence from newly industrialized countries. *Environment, Development and Sustainability*. 2022; 24(3):4244-4277. DOI: 10.1007/s10668-021-01614-7
3. Bakaeva N., Le M.T. Determination of urban pollution islands by using remote sensing technology in Moscow, Russia. *Ecological Informatics*. 2022; 67:101493. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101493.
4. Grafkina M.V., Azarov A.V., Dobrinsky D.R., Nikolenko D.A. On the Issue of control and normalization of fine dust emissions into the atmospheric air during the road transport movement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2017; 12(4):(103):373-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380 (rus.).
5. McDuffie E.E., Martin R.V., Spadaro J.V., Burnett R., Smith S.J., O'Rourke P. et al. Source sector and fuel contributions to ambient PM_{2.5} and attributable mortality across multiple spatial scales. *Nature Communications*. 2021; 12(1). DOI: 10.1038/s41467-021-23853-y
6. Xi Y., Richardson D.B., Kshirsagar A.V., Wade T.J., Flythe J.E., Whitsel E.A. et al. Effects of short-term ambient PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U.S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study. *Environmental Health*. 2022; 21(1). DOI: 10.1186/s12940-022-00836-0
7. Alexeeff S.E., Liao N.S., Liu X., Van Den Eeden S.K., Sidney S. Long-term PM_{2.5} exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: review and meta-analysis. *Journal of the American Heart Association*. 2021; 10(1):e016890. DOI: 10.1161/JAHA.120.016890
8. Meo S.A., Ahmed Alqahtani S., Saad binmeather F., Abdulrhman AlRasheed R., Mohammed Aljedaie G., Mohammed Albarrak R. Effect of environmental pollutants PM_{2.5}, CO, O₃ and NO₂, on the incidence and mortality of SARS-COV-2 in largest metropolitan cities, Delhi, Mumbai and Kolkata, India. *Journal of King Saud University — Science*. 2022; 34(1):101687. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101687
9. Wen J., Chuai X., Gao R., Pang B. Regional interaction of lung cancer incidence influenced by PM_{2.5} in China. *Science of the Total Environment*. 2022; 803:149979. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149979
10. Cristaldi A., Fiore M., Conti G.O., Pulvirenti E., Favara C., Grasso A. et al. Possible association between PM_{2.5} and neurodegenerative diseases: A systematic review. *Environmental Research*. 2022; 208:112581. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112581
11. Chowdhury S., Pozzer A., Haines A., Klingmüller K., Münzel T., Paasonen P. et al. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols. *Environment International*. 2022; 159:107020. DOI: 10.1016/j.envint.2021.107020
12. Wang Y., Xiao S., Zhang Y., Chang H., Martin R.V., Van Donkelaar A. et al. Long-term exposure to PM_{2.5} major components and mortality in the southeastern United States. *Environment International*. 2022; 158:106969. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106969
13. Borisov M.V., Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Normative and technical regulation in the field of urban green space arrangement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(2):212-222. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.212-222 (rus.).
14. Le M.T., Gelmanova M.O., Shukurov I.S., Slesarev M.Yu., Nguyen V.M. Investigation of the influence of Hanoi landscaping on the effect of urban heat island. *Biosphere Compatibility: Man, Region and Tech-*

nologies. 2021; 1(33):35-50. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-35-50

15. Zhang L., He J., Gong S., Guo X., Zhao T., Zhou C. et al. Effect of vegetation seasonal cycle alterations to aerosol dry deposition on PM_{2.5} concentrations in China. *Science of the Total Environment*. 2022; 828:154211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154211

16. Yang Y.-L., Yang K., Luo Y., Yu Z.-Y., Meng C., Li C. Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's eight major economic regions from 1998 to 2016. *Environmental Science*. 2021; 42(11):5100-5108. DOI: 10.13227/j.hjx.202101277

17. Wroblewska K., Jeong B.R. Effectiveness of plants and green infrastructure utilization in ambient particulate matter removal. *Environmental Sciences Europe*. 2021; 33:110. DOI: 10.1186/s12302-021-00547-2

18. Bi S., Dai F., Chen M., Xu S. A new framework for analysis of the morphological spatial patterns of urban green space to reduce PM_{2.5} pollution: A case study in Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 82:103900. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103900

19. Chen M., Dai F., Yang B., Zhu S. Effects of neighborhood green space on PM_{2.5} mitigation: Evidence from five megacities in China. *Building and Environment*. 2019; 156:33-45. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.03.007

20. Baraldi R., Neri L., Costa F., Facini O., Rapparini F., Carriero G. Ecophysiological and micromorphological characterization of green roof vegetation for urban mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 37:24-32. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.03.002

21. Abhijith K.V., Kumar P., Gallagher J., McNabola A. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments — A review. *Atmospheric Environment*. 2017; 162:71-86. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

22. Eniolu T.M., Fat Y.L., Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of Environmental Management*. 2016; 182:595-605. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077

23. Feng H., Ding Y., Zou B., Cohen J.B., Ye S., Yang Z. et al. Vegetation-related dry deposition of global PM_{2.5} from satellite observations. *Journal of Geographical Sciences*. 2022; 32:589-604. DOI: 10.1007/s11442-022-1962-0

24. Xie C., Guo J., Yan L., Jiang R., Liang A., Che S. The influence of plant morphological structure characteristics on PM_{2.5} retention of leaves under different wind speeds. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022; 127556. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127556

25. Chen M., Dai F., Zhu S. Effects of spatial forms of green infrastructure in block scale on PM₁₀ and PM_{2.5} removal — a case study of the main city of Wuhan. *Landscape Research Record*. 2018; 7:134-142.

26. Cascone S. Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sustainability*. 2019; 11(11):3020. DOI: 10.3390/su11113020.

27. Liu H., Kong F., Yin H., Middel A., Zheng X., Huang J. et al. Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*. 2021; 196:107794. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107794

28. Cascone S., Catania F., Gagliano A., Sciuto G. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*. 2018; 136:227-239. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.052

29. Gelmanova M.O. Methodology of physical and technical research "green roofs". *Days of Student Science*. 2018; 1354-1356. (rus.).

30. Sysoeva E.V., Gelmanova M.O. The study of green roofing in the coverings of public buildings. *Construction and Reconstruction*. 2018; 2:105-112. (rus.).

31. Shafique M., Kim R., Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 90:757-773. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.006

32. Sysoeva E., Gelmanova M. Theoretical study of "Green Roof" energy efficiency. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 186-198. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_18

33. Speak A.F., Rothwell J.J., Lindley S.J., Smith C.L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*. 2012; 61:283-293. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.07.043

34. Rasul M.G., Arutla L.K.R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. *Energy Reports*. 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.09.015

35. Currie B.A., Bass B. Estimate of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*. 2008; 11:409-422. DOI: 10.1007/s11252-008-0054-y

36. Jun Yang J., Yu Q., Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*. 2008; 42:7266-7273. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.003

37. Luo H., Wang N., Chen J., Ye X., Sun Y. Study on the thermal effects and air quality improvement of green roof. *Sustainability*. 2015; 7(3):2804-2817. DOI: 10.3390/su7032804

38. Viecco M., Vera S., Jorquera H., Bustamante W., Gironás J., Dobbs C. et al. Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates. *Sustainability*. 2018; 10(7):2431. DOI: 10.3390/su10072431

39. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa "Beaupré", Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*. 2005; 133:157-167. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.03.031

40. Leonard R.J., McArthur C., Hochuli D.F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2016; 20:249-253. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.09.008
41. Weerakkody U., Dover J.W., Mitchell P., Reiling K. Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018; 30:98-107. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.01.001
42. Tong Z., Whitlow T.H., Landers A., Flanner B. A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm. *Environmental Pollution*. 2016; 208:256-260. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.006
43. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*. 2021; 204:108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120
44. Niu H., Clark C., Connelly M., Busiek B., Adriens P. Quantitative assessment of green roof benefits for Vancouver. *Cities Alive 8th annual green roof wall conference*. 2010.
45. Shin E., Kim H. Benefit-cost analysis of green roof initiative projects: The case of Jung-gu, Seoul. *Sustainability*. 2019; 11(12):3319. DOI: 10.3390/su11123319
46. Sysoeva E.V., Moskvitina L.V. Effectiveness of application of “green” roofs in Russia. *Innovations and Investments*. 2021; 10:251-259. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-123 (rus.).

Received August 30, 2022.

Adopted in revised form on September 1, 2022.

Approved for publication on September 1, 2022.

B I O N O T E S : **Elena V. Sysoeva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Buildings and Structures Design Department; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ResearcherID: AFJ-9050-2022, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Margarita O. Gelmanova — postgraduate student, Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8462-8299; ORCID: 0000-0003-2232-5239; margo.gelmanova@yandex.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Elena V. Sysoeva — scientific guidance, scientific editing of the text of the article, final results and conclusions.

Margarita O. Gelmanova — collection and processing of material, writing of the source text and its revision in accordance with the provided adjustments, formation of results and conclusions.

Mikhail Yu. Slesarev — scientific consulting, scientific editing of the text of the publication and conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.

A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load

Hayder Abbas Ashour AlAraza^{1,2}, Kharun Mahmud^{1,3}

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN); Moscow, Russian Federation;

² University of Kerbala; Kerbala, Iraq;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Airport runway pavement is always subjected to considerable impact loads as a result of aircraft landing heavily on the concrete surface. As a result, runway pavements must have adequate strength and durability capability to avoid damage caused by a hard impact, such as surface deflection downward or penetration, because repair works are inconvenient within the operating conditions of the airport and increase the service life cost of the pavement structure. 3DFE research is carried out to identify some beneficial elements in influencing the concrete and base layers deformation of the runway pavement.

Materials and methods. The research developed 3D finite element model from the previews study by using the Explicit Dynamics model using the Ansys workbench. The concrete characteristics such as slab thickness, concrete density, modulus of elasticity, flexural tensile strength, and compressive strength of the runway pavement are tested, while the impactor weight and velocity are chosen and investigated too.

Results. The results included the effect of 4–7 different values for each factor. The depression of the concrete and base layers is presented.

Conclusions. The main conclusion that can be drawn from this work is that flexural tensile strength, compressive strength, and slab thickness have a significant effect on the concrete depression of the runway pavement as well as the impactor weight and velocity.

KEYWORDS: concrete runway pavement, impact load, concrete deformation, concrete depression, rigid pavement, explicit dynamics model, Ansys Workbench, 3D finite element model

FOR CITATION: Hayder Abbas Ashour AlAraza, Kharun Mahmud. A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1206-1217. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1206-1217 (rus.).

Corresponding author: Hayder Abbas Ashour AlAraza, Hayder@uokerbala.edu.iq, hayder3a@gmail.com.

Параметрическое исследование прогиба слоев бетонного покрытия взлетно-посадочной полосы при ударной нагрузке

Хайдер Аббас Ашур АлАраза^{1,2}, Харун Махмуд^{1,3}

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН); г. Москва, Россия;

² Университет Кербелы; г. Кербела, Ирак;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИИ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Покрытие взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта всегда подвергается значительным ударным нагрузкам в результате тяжелой посадки самолетов на бетонную поверхность. В связи с этим покрытия ВПП должны обладать достаточной прочностью и долговечностью, чтобы избежать повреждений, вызванных сильным ударом, таких как прогиб поверхности или пробивание, поскольку ремонтные работы в условиях эксплуатации аэропорта затруднительны и имеют немалую стоимость. Исследование проводится для выявления параметров, влияющих на деформацию бетона и базовых слоев покрытия ВПП.

Материалы и методы. Разработана 3D-модель конечных элементов на основе предварительных исследований с помощью модели Explicit Dynamics и использования рабочей среды Ansys. Рассматривались характеристики бетона, такие как толщина плиты, плотность бетона, модуль упругости, прочность на изгиб и прочность на сжатие покрытия ВПП, а также вес и скорость ударного элемента.

Результаты. Результаты включали влияние 4–7 различных значений для каждого фактора. Представлена депрессия бетонного и базового слоев.

Выводы. Основной вывод, который можно сделать, заключается в том, что прочность на изгиб при растяжении, прочность на сжатие и толщина плиты оказывают существенное влияние на депрессию бетона покрытия ВПП, а также на вес и скорость ударного элемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетонное покрытие взлетно-посадочной полосы, ударная нагрузка, деформация бетона, углубление в бетоне, жесткое покрытие, явная динамическая модель, Ansys Workbench, 3D-модель конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Hayder Abbas Ashour AlAraza, Kharun Mahmud.* A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1206–1217. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1206-1217

Автор, ответственный за переписку: Хайдер Аббас Ашур АлАраза, Hayder@uokerbala.edu.iq, hayder3a@gmail.com.

INTRODUCTION

During a big aircraft landing, the airport runway surface is subjected to significant impact loading [1]. Extremely big and heavy aircraft have also been developed to accommodate travel demand, which may impose a significant impact force on runway pavement. As a result of such an impact, some neighboring regions of the top surface layer of runway pavement are penetrated or depressed. The level of damage can vary depending on parameters such as aircraft weight, velocity, and landing angle, as well as material properties and runway pavement thickness.

A few experimental, infield, and finite element-based research investigations were done to better understand the behavior of concrete/rigid runway pavement. The consequences of impact loads caused by forceful landings of big aircraft on airport runways have been studied by Ku et al. [2]. The flexible pavement on a runway at Cagliari-Elmas Airport in Italy was studied in situ for its responsiveness to aircraft operations was investigated by Al-Qadi et al. [3]. Rufino et al. conducted a comprehensive infield experiment at Denver International Airport to investigate slab-Base interaction. Gap analysis from deflection data, interface analysis from paired strain data, and comparison of predicted and observed strains were the three aspects of this technique. The gap investigation demonstrated that there are gaps between the slab and the foundation, depending on the temperature differential and slab location. Based on temperature fluctuations and slab location, a gap analysis between the slab and the Base was conducted. During the gap analysis, an effective built-in temperature difference was also identified. Despite the presence of gaps beneath the slab, the paired strain data analysis indicated contact friction or bonding action under wheel loads. The maximum contact friction was found in the slab interior, followed by doweled transverse joints and transverse dummy joints, while tied longitudinal joints showed an unexpected full-slip state. According to a comparison of observed and predicted strain, contact friction is formed when airplane gear is loaded [4]. Buonsanti et al. developed a finite elements (FE) technique to evaluate contact stresses in a flexible pavement under landing aircraft weights [5].

A comprehensive study has been conducted to evaluate runway pavement degradation and to provide

improvements, specifically for such pavement under moving aircraft loads. Kim and Tutumluer [6] used a finite element (FE) analysis to investigate the impacts of multiple wheel load interaction on the flexible runway pavement rather than a single wheel load condition under moving aircraft load.

Maitra et al. investigated the influence of contact friction on concrete pavement response. The interface friction of ordinary concrete pavements was measured using a series of push-off tests. For this purpose, concrete slabs were placed over several types of bases with smooth and rough interface conditions. The influence of various interface conditions on the critical responses of pavement subjected to the combined action of axle load and temperature fluctuation was explored using parametric analytical investigation and the FE technique. A negative temperature gradient creates substantially higher tensile stresses at the slab top when the contact between the slab and the base is rough. The tensions grow considerably higher when axle load is added. In addition, Corner deflections are also shown to be considerable when compared to deflections at the margins or within the interior region, according to the study. A concrete slab with a smooth contact is helpful during seasonal temperature variations because horizontal motions are free, resulting in reduced tensile stresses [7].

Caliendo and Parisi propose two specific 3-dimensional FE models for assessing maximum stresses at critical sites in concrete slabs (i.e., at the interior and edge) that outperform approximation approaches. Research on square-shaped slabs on concrete airport pavements is now underway. A homogeneous, isotropic elastic half-space is employed as a subgrade (foundation) model to explore the influence of change in Young's modulus, in contrast to Winkler's response modulus. The effects of two planes (the A380 and the B747), as well as different subgrade bearing capabilities and temperature gradients, are investigated. The combined stresses caused by aircraft load and temperature gradients are precisely predicted and compared to their effects using FE software. As a consequence, the erroneous application of the concept of effect superposition, which is produced by the tensile stress resistance of the supporting soil, is measured. It is calculated the difference in stress levels induced by the two distinct airplanes. The results of the FE software are also utilized to develop a more straightforward method for determining

maximum stresses. This predictive approach is useful for calculating stresses in the preliminary design phase more rapidly. Revisions to Westergaard's load stress model and Eisenmann's temperature stress model, as well as unique load and t actions, are required in the proposed equations. Because the method uses dimensionless variables, it may be used for a wide range of square slab dimensions [8].

An impact is an alternative method of creating a short-term dynamic reaction in a structure, similar to the loading induced by a blast event in certain ways. The layer type of the target is important in this study since the runway pavement is a layering system. When a layered-type target material is affected, stresses and strains are created. When the layer of particles in the target is squeezed, compressive stress is formed. As a result of this process, which is analogous to, stress waves are created. Only a few studies have looked into the post-cracking performance of BF HPC. This is troublesome because, in many actual applications, initial crack strength is not enhanced. The inclusion of fibers, on the other hand, helps the post-cracking reaction the most. Chopped BF and MiniBars BF have both been shown to increase the flexural toughness of concrete. However, establishing the relative worth of each product is difficult because the findings are based on different test procedures. According to the ACI Committee 544 proposed to drop weight test for impact resistance, BF can considerably enhance performance after cracking. The outcome, on the other hand, is based on data from four or six instances per concrete mix. This testing process, which demands around 40 specimens for each combination, is prone to large variations. The test process is notorious for its large variations, necessitating roughly 40 specimens per mix to keep the percent error of recorded mean values below 10 %. Li and Xu [9] observed that BF may significantly increase the energy absorption capacity of geopolymers concrete during impact loading using a Split-Hopkinson pressure bar technique. However, nothing is known regarding the impact performance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) in general. Because the results of impact testing obtained using various test methodologies are seldom comparable, the results of a basic test method may serve as a more practical standard against which future comparisons may be made. Because BFRC is a newer organization, this is extremely crucial.

In research by Wu et al., an intriguing technique combines a constructed multilayer pavement runway and evaluates it under blast stress. There are two sorts of slabs. A series of field explosion tests were conducted to assess the new multilayer pavement's performance in the field. Two 275 mm thick slabs of pavement were cast and tested. The initial slab, which had an Asphalt Concrete layer of 75 mm thickness, was reinforced with Geogrid, then the High Strength Concrete layer of 100 mm thickness, and lastly the Engineered Cementitious Composites layer (100 mm thickness). The second slab

was a 275 mm thick ordinary concrete pavement. The novel multilayer pavement outperformed the standard pavement system, according to the study. In addition, using 3D FE numerical modeling, the dynamic behavior of the two slabs subjected to blast stress is studied [10].

The behavior of thin slabs of High Strength-High Ductility Concrete after many moderate-velocity hits is evaluated using drop weight impact tests. High Strength-High Ductility Concrete is a fiber-reinforced cementitious composite that combines compressive strength (more than 150 MPa) and tensile ductility in a single material (more than 3 percent). Deformation processes, cracking patterns, and impact load resistance of high strength-high ductility concrete slabs are researched and compared to slabs made of Cor-Tuf, a fiber-reinforced ultra-HPC with a compressive strength of around 200 MPa. The ductile flexural behavior of the High Strength-High Ductility Concrete slabs is characterized by many tiny cracks that are equally distributed, whereas the quasi-brittle flexural and shear failures of the Cor-Tuf slabs are characterized by large, localized fractures and severe spalling. According to a FE investigation of their responses, the observed difference in structural behavior of High Strength-High Ductility Concrete and Cor-Tuf slabs is a direct result of the differential in tensile ductility of these two materials [11].

Damage such as surface penetration depth happens as a result of an airplane's landing. As a consequence, a three-dimensional FE analysis (three-dimensional FE analysis) is conducted to identify some relevant criteria for regulating the top surface penetration depth of runway pavement. The mass, velocity, impact angle, and boundary conditions of the impactor are determined as exterior factors, whereas the thickness, compressive strength, and density of materials used in the runway pavement are chosen as internal characteristics. The impact angle has a significant influence on the top surface deflection for both types of runway pavement, according to the study. When the impact angle is adjusted from 30 to 60 degrees, surface penetration of runway pavement rises by around 78 percent, whereas it increases by about 42 percent when the impact angle is changed from 60 to 90 degrees. Surface penetration improves significantly with increases in concrete compressive strength up to the normal strength concrete range (30 to 50 MPa). Again, utilizing enough high-strength concrete has been shown to help reduce surface depression [12].

Yan et al. investigated the interlayer bond quality of a double layer runway pavement using a splitting tensile test with a double layer Beam configuration. For the splitting tensile test, a $150 \times 150 \times 150$ mm cube specimen was created, with half of the specimen made of new cement concrete and the other half made of aged cement concrete. A fiber grid was laid down on the bottom of the old cube, and the new cube was then linked to the old overlay cube. The loading velocity for the splitting tensile test was 0.08 MPa/s. The researchers found that adding fiber to concrete increases its splitting tensile

strength by up to 32 %, with 5 mm BF being the most effective. They also took strain readings in the Beam's top and bottom layers. The strain distribution in the two-layer Beam was found to be essentially linear across its depth. The lower Beam was discovered to carry the tensile load, while the higher Beam absorbed compressive stress. Horizontal friction between the interfaces of double-layer beams also lowered tensions between the top and bottom layers by 44 to 98 percent, according to the researchers. The size of the coarse aggregate, on the other hand, did not influence a concrete material component [13].

Cao studied BFRC's static and impact behaviors. Compressive, flexural, splitting tensile, and impact test properties were all included in the investigation. In addition, the effects of fiber mixing amount on concrete mechanical properties were investigated, and the appropriate fiber mixing amount was identified. The research looked at five different BF concrete mixtures as well as a control mix. According to the findings, the static and impact test behaviors of BFRC were considerably improved, and strengthening and toughening effects were accomplished. The ideal BF percentage was reported to be between 1.5 and 2 kg/m³ [14].

Fu et al. investigated the impact analysis and modeling of mineral admixture basalt polypropylene fiber reinforced concrete [15]. The impact load test was carried out with a 75 mm Split-Hopkinson pressure bar. According to the findings, the dynamic compressive strength, dynamic elastic modulus, and critical strain of basalt polypropylene fiber reinforced concrete all increased as the strain rate rose. The addition of basalt fiber (BF) and polypropylene fiber (PF) to concrete improved the strain rate effect of dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus, as well as the deformation capacity of the concrete. PF had a greater influence on the strain rate effect of dynamic compressive strength of concrete than BF. However, there was no difference in the impacts of BF and PF on the strain rate effect on the dynamic elastic modulus of concrete. The strain rate effect of BPFRC's dynamic compressive mechanical behavior revealed a significant positive relationship with fiber hybrid volume. The proposed viscoelastic damage constitutive models from this work might be used to accurately reflect BPFRC's dynamic mechanical behavior [15]. The strain-rate influence of the dynamic compressive strength, dynamic elastic modulus, critical strain, specific energy absorption, and characteristic length of HBPRC was fully investigated. The findings demonstrated that when the strain rate grew, so did all of the HBPRC's mechanical indices. The dynamic growth factors of compressive strength and elastic modulus rose linearly as the decimal logarithm of the strain rate grew, but the critical strain and characteristic length increased linearly as the strain rate increased [16].

In response to environmental parameters, Wei et al. investigated nonlinear strain distribution in a field-instrumented concrete pavement slab. When measuring the curling and warping of a concrete pavement slab,

the strain is generally considered to be distributed linearly across the slab depth, and a plane section is expected to keep its plane after deformation. The strain distribution in a concrete slab, on the other hand, may not be linear due to the material's viscoelastic nature. This study examined the temperature and strain development at various depths in a field-instrumented concrete pavement slab starting 12 hours after construction. The nonlinear distribution characteristics of temperature and strain along the slab depth were explored at the slab corner and center. According to the measurements, temperature and strain were determined to be nonlinearly distributed together with slab thickness. The nonlinear distribution, particularly the strain, was more severe at the slab corner than at the slab center. This work presents a method for determining the slab depth and the amount of drying shrinkage induced by external drying [17].

Curling stresses of continuously reinforced concrete pavements as a function of foundation parameters were studied by Zhang [18]. A realistic evaluation of the curling Stresses of Continuously Reinforced Concrete Pavements (CRCP) under various types of bases is necessary for the reasonable design of concrete pavements. The effects of six common bases on curling stresses of CRCP subjected to temperature changes are investigated in this paper using a 2D FE technique. When establishing Base characteristics, both the frictional bond-slip stiffness and the Base stiffness are taken into consideration. When compared to the vertical stiffness of the underlying Base, a stiffer foundation is shown to be desirable for CRCP in terms of concrete stress, whereas the bond-slip relationship between slab and Base (with no interface treatment) does not influence concrete stresses. The variation in steel stress between six standard bases is not significant. Due to the CRCP slab fracture, the steel is in a tensile state at the longitudinal site, and even with a small temperature differential, the maximum curling stress can be rather high [18].

The investigation by Tian et al. established a method for evaluating cumulative damage factors based on Miner's law to improve airport runway stiff pavement design [19]. This approach makes use of data from measured aircraft wheel drifts as well as built-in influence surfaces. We built an aircraft wheel wander measuring system and measured actual aircraft wheel loading locations at Shanghai Hongqiao International Airport (SHA). To generate influence surfaces, we employed finite element analysis (FEA) and multivariate interpolation. Researchers utilized FEA on a nine-slab model to simulate load transfer effects. Based on the observed wheel wander distribution and the created influence surface, a cumulative damage surface construction approach for estimating cumulative damage factors is proposed. The proposed cumulative damage surface technique offers the following preliminary benefits: (1) each load repetition's damage is addressed independently for the computation of the cumulative damage factor, and (2) the load transfer impact is considered using FEA simulations. Furthermore, the field

data we collected at SHA reveals that the extreme value distribution better reflects aircraft wheel drift than a normal (uniform) distribution. When the maximum cumulative damage factors calculated using the extreme value distribution are compared to those estimated using the normal distribution, the maximum cumulative damage factors projected using the extreme value distribution are 210 percent higher. According to the different cases analyzed in this study, the recommended cumulative damage surface methodology gives lower cumulative damage factors values than the normal Civil Aviation Administration of China method [19].

Park et al. [20] suggest enhanced criteria for material quality and mix proportions of concrete slabs to improve the performance of concrete pavements at Incheon International Airport in the Republic of Korea. Two comparable airports were chosen for comparison with Incheon IA based on their facilities status and annual flight processing capacities. Both other airports, after Incheon International Airport, have the second and third greatest annual numbers of flights per unit area of the runway. Because of the poor quality of the aggregates used and the frequent freeze-thaw cycles, standards for aggregate and mix proportions were established to improve crack durability. When compared to the other airports, the concrete slab mix requirements at Incheon IA revealed smaller amounts of cement and liquid admixture, a higher abrasion rate of coarse aggregate, and a larger proportion of fines in the aggregate. New criteria were devised based on the comparison of outcomes. Using the updated criteria, the performance of the concrete pavement was evaluated by measuring the air content and freeze-thaw resistance of 12 mixes with varying amounts of cement, liquid admixture, and particles in the aggregate. Increases in cement and liquid admixture concentration, as well as a decrease in fines content in the aggregate, were found to improve air content and freeze-thaw resistance of the concrete runway, according to the study [20].

Studying the individual factors' implications on the infrastructures' dynamic reaction during impact via

full-scale experiments is usually out of reach. To estimate the dynamic reaction of infrastructure subjected to impact loadings with varying parameters, numerical simulation is typically used. As a result, a thorough numerical analysis was performed to investigate the important determining parameters accountable for runway concrete pavement layer and base layer deformation under the impact load. This research will begin with the verification of the numerical model on the concrete pavement by applying experimental results from previous research [21]. To accomplish this, a 3D FE model is developed using Ansys Workbench 2022R1. Following validation, a thorough parametric analysis is performed to assess the influence of various factors on the performance of runway pavement under impact loading, particularly the surface penetration depth of concrete runway pavement and base layer. These factors include impactor and concrete properties. The impactor properties used included the velocity of the impactor, impactor mass, and impactor density. While the runway concrete properties include slab thickness, concrete density, modulus of elasticity, flexural tensile strength, and compressive strength.

MATERIALS AND METHODS

In this part of the study, a methodology for developing a FE model to simulate HPC under the impact load is presented, followed by a validation of the FE model using literature data. Wu's (2018) drop weight experimental approach on a normal concrete pavement was used for validation [21]. Furthermore, the impact resistance of several different BF HPC was examined using a rigid pavement FE model that has been established. A parametric study was also conducted to investigate the impact of various parameters on the impact resistance of the validated FE models. An Explicit Dynamics analysis is used to estimate the dynamic response of a structure due to stress wave propagation, impact, or rapidly changing time-dependent loads. Momentum exchange and inertial effects between moving objects

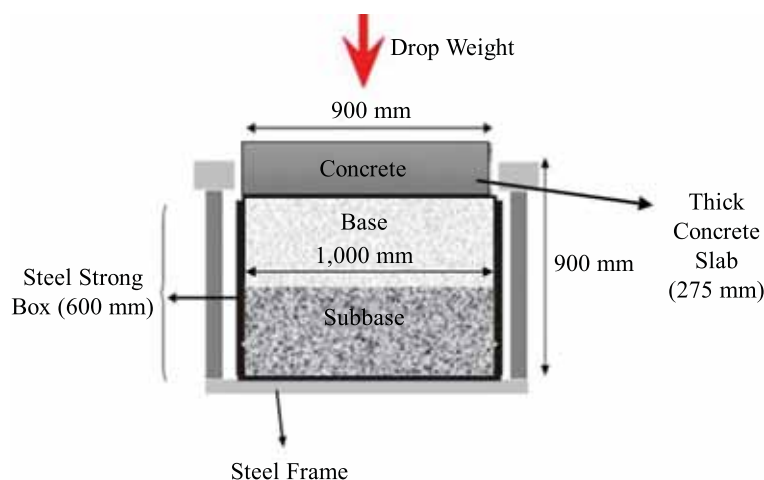


Fig. 1. Experimental setup of concrete pavement specimens

are typically important aspects of the studies that are conducted. This type of analysis may also be used to model mechanical processes that are exceedingly nonlinear. Materials, contact, and geometric deformation can all induce nonlinearity. This type of research can successfully duplicate events that happen in fractions of a second (typically on the order of 1 millisecond). For longer-duration events, consider using a transient analysis system¹.

To confirm the experimental impact load, a 3D FE simulation was performed in Ansys Workbench Explicit Dynamic [21]. A 3D FE simulation in Ansys Workbench Explicit Dynamic was used to corroborate the experimental impact load. The study uses explicit materials since they include data that is particular to an Explicit Dynamics analysis. On top of the subgrade, a 275 mm thick concrete slab was used to construct the model. There are two strata to the subgrade. Geocell reinforced sand is found in the top sand layer, whereas compacted sand is found in the bottom layer. As indicated in Fig. 1, each subgrade layer measured $1,000 \times 1,000 \times 300$ mm, whereas the concrete slab utilized in the experiment was $900 \times 900 \times 275$ mm. Fig. 2 shows the drop weight apparatus that was used. The impact load of 1,181 kg was applied at the mid-point of the top surface of the concrete slab using a 100 mm hemispherical drop mass. The test used a drop height of 1.5 m with an impact velocity of 5,133 m/s. The mechanical properties of the materials used in the FE model analysis are given in Table 1–3.



Fig. 2. Drop weight test machine

Table 1. Mechanical properties of concrete slab

Parameters	Value
Young's modulus E , GPa	33
Poisson's ratio ν	0.2
Density ρ , kg/m ³	2,400
Compressive strength f_c , MPa	54
Flexural Tensile strength f_t , MPa	2.7

Table 2. Mechanical properties of subgrade

Parameters	Geocell reinforced sand	Sand
Young's modulus E , MPa	103.5	40
Poisson's ratio ν	0.3	0.3
Density ρ , kg/m ³	1,600	1,600
Friction angle β , degrees	40	40
Cohesion c , kPa	89	13.8

Table 3. Mechanical properties of the Impactor

Parameters	Impactor
Young's modulus E , GPa	207
Poisson's ratio ν	0.3
Density ρ , kg/m ³	118,000
Yield strength f_y , MPa	500

Element Selection and Material Modeling

Concrete Slab

The concrete model in explicit materials provided in Ansys Workbench was used to model a concrete slab. Table 1 was used to alter the parameters of the concrete slab. The elastic parameters were chosen in accordance with Wu [21], and the plastic characteristics were taken into account following Riedel et al. [22].

Subgrade

The subgrade was also modeled using the Ansys Workbench's sandstone material attributes. The elastic-plastic behavior of subgrade soil was simulated using the Drucker – Prager plasticity model. The properties of geocell reinforced and ordinary subgrade sand are listed in Table 2.

Drop Mass

In the experiment, a drop mass of 1,181 kg was employed, as indicated in Fig. 1. The impactor was modeled using explicit materials in Ansys Workbench, with the mechanical characteristics changed to match the impactor used in the experiment. In addition, to match the overall weight, a point mass was placed on the top of the impactor.

Wu's (2018) cylindrical-shaped hemispherical impactor's detailed specifications are shown in Table 3. The impactor's Stiffness Behavior is set to stiff.

¹ ANSYS I. Mechanical User's Guide 2021-R2. Ansys. 2021; 15317(July):1028.

FE Meshing and Contact Modelling

The quantity and precision of meshes required for element meshing define the mesh size. Choosing the right mesh size for the FE model was crucial for accurate analytical findings and, more importantly, for high strain loading. A tiny mesh size was used for the whole model to achieve a better outcome. The concrete slab was chosen with a finer mesh size than the subgrade because it was immediately subjected to impact load. A mesh size of 5 mm for the concrete slab and 8 mm for the subgrade was chosen based on the convergence study. With linear element order, explicit mesh types are employed. The aspect ratio (Explicit) approach was utilized to create a high-quality mesh. Fig. 3 shows the Symmetric FE meshing of concrete pavement specimens.

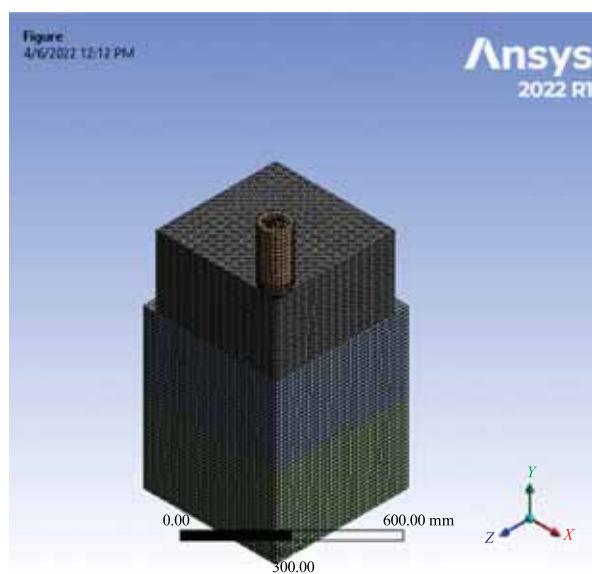


Fig. 3. Symmetric FE meshing of concrete pavement specimens

A generic contact algorithm was used to characterize the interaction between a hemispherical impactor and a concrete pavement specimen. By linking together, the contact surfaces of the concrete slab and the subgrade, the surface-to-surface interaction between the concrete slab and the subgrade was calculated. The hard contact formula was used to characterize normal stress behavior in both the general and surface-to-surface contact approaches, while the penalty frictional formulation was used to define tangential stress behavior at contact surfaces. A similar modeling approach was utilized to simulate the interaction between the textile belt and

the concrete slab. However, because the normal friction coefficient maintains within the range of 0.4–0.55 under impact loading, a dynamic friction coefficient of 0.45 was chosen at the point of contact between neighboring surfaces. Boundary Conditions and Loadings.

The fixed support condition was applied on the Subbase bottom. Two sides of the Subbase, two sides of the Base, and two sides of the concrete pavement were believed to have symmetric support. On the other two sides, there was no restriction on the use of the concrete pavement. On the other two sides of the Base and Subbase, the displacement boundary condition is utilized. The impactor's other vertical sides were kept from moving to the side. For all bodies, the standard Earth Gravity is specified.

Validation of FE Model

The outcomes of Wu's drop weight impact tests were compared with the results obtained from the Developed FE model of concrete pavement specimens. The Researcher found the greatest vertical deflections at three sites on the top surface of the concrete pavement specimen [23] (see Fig. 4).

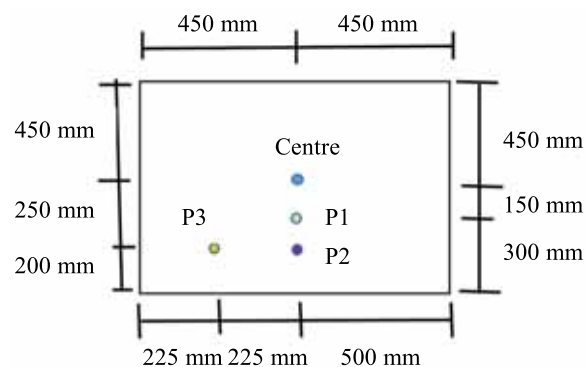


Fig. 4. Selected locations to measure deflections by Wu (2018)

As a consequence, the symmetric FE model was confirmed at the three sites with the maximum vertical deflections. The highest downward deflections observed in the impact test and computed using FE analysis at these three specified locations of the concrete pavement specimen exposed to a single impact force at a velocity of 5,133 m/s are shown in Table 4. The experimental and FE models were found to accord rather well. The FE result was found to be about 1.03, 0.99, and 0.99 for the P1, P2, and P3 sites, respectively, with Coefficients of Variation of 0.0245, 0.0065, and 0.0343.

Table 4. Maximum deflections of concrete slab under the impact load

Location	Maximum deflection in FE analysis, mm	Maximum deflection in experimental investigation of Wu (2018), mm	FE result/experimental result	Coefficient of variation, CoV
P1	26,992	26.07	1.03	0.0245
P2	26,811	27.06	0.99	0.0065
P3	26,654	27.98	0.99	0.0343

In the FE analysis, penetration in the region of the impact loading application directed the failure of a concrete slab, which was determined to be the same as Wu's experimental test. Based on Wu's impact test, Fig. 2. 16 displays the concrete pavement failure mechanisms. As a consequence, the constructed FE model properly anticipated the behavior of the concrete pavement specimen, and the confirmed FE model was used in the parametric analysis described in the following sections.

RESULTS OF THE RESEARCH

The effects of various factors on the behavior of a concrete slab (900, 900 and 275 mm thick) to impact loads were studied using parametric research. More importantly, parametric research was conducted to assess the influence of various factors on the concrete slab's deflection. The impact load's influence on the deformation of both concrete and sand layers was determined using parametric research. There were three types of parametric studies in the research. Concrete and impactor characteristics were among these. The slab thickness, concrete density, modulus of elasticity, and compressive and flexural tensile strength were among the concrete parameters. The velocity and weight of the impactor were among the impactor attributes. The investigation also discovered that the concrete's Poisson ratio had no effect.

Slab Thickness

A thicker pavement slab would enhance the structure's bending resistance and provide greater protection for the base and subbase layers when subjected to static or dynamic stresses. On the other hand, the thickness of the pavement slab cannot be extended forever. In rigid pavement design, the slab thickness was commonly specified at 200 to 300 mm [24].

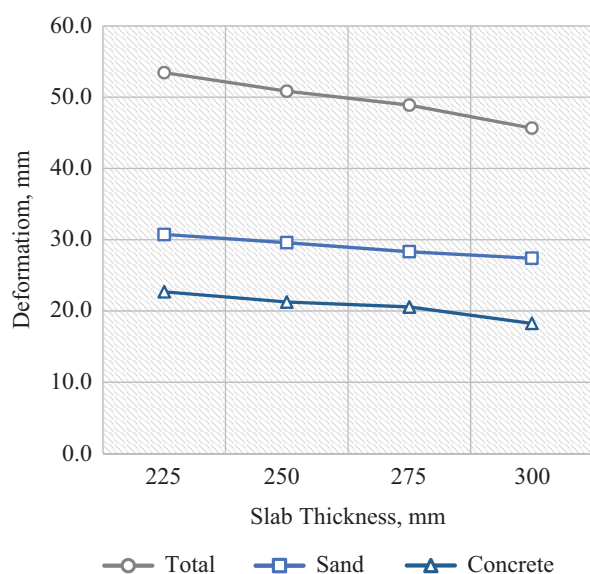


Fig. 5. Slab thickness effect on the deformation

Four different thicknesses of concrete slabs were chosen to explore the effect of slab thickness on modifying the deflection of concrete slabs under impact loading: 225, 250, 275, and 300 mm. The compressive strength of the concrete was maintained at 54 MPa. Variation in concrete slab deflection as a function of concrete slab thickness is shown in Fig. 5. As the slab thickness grows, the deflection of the concrete slab decreases within the prescribed values, as shown in Fig. 5. The deflection in the Sand layer and concrete slab layer was reduced by 3.75 and 6.4 percent, respectively, when the slab thickness was raised from 225 to 250 mm. When the thickness of the Sand and Concrete layer was extended to 300 mm, the decrease climbed to 11 and 18.3 percent, respectively. As a result, the slab thickness is expected to have a significant influence on impact deflection.

Concrete Density

The density of the concrete used for the concrete slab was chosen as 2,300, 2,350, 2,400 and 2,400 kg/m³, with a constant concrete slab thickness of 275 mm and concrete compressive strength of 54 MPa, to investigate the influence of concrete density on the deflection of the concrete slab under the impact load. Fig. 6 shows how the deflections of a concrete slab and sand layer vary as the concrete's density varies. The deflection of the concrete slab was reduced by 3.7 percent and the deflection of the sand layer was reduced by 1.3 percent when the concrete density was increased to between 2,300 and 2,350 kg/m³. The amount of sand deflected reduced by 0.6 to 1.8 percent. Furthermore, the concrete deflection fell from 0.65 to 3.7 percent. The deflection was marginally reduced by the concrete density.

Modulus of Elasticity

To investigate the effects of the modulus of elasticity on the deflection of the concrete slab under the impact

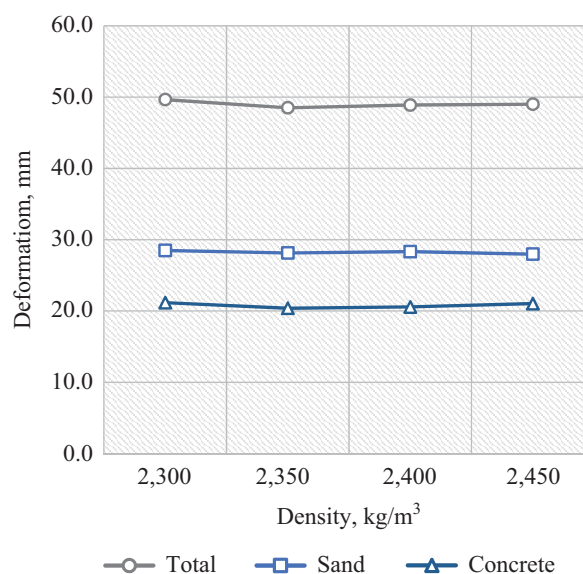


Fig. 6. Concrete density effect on the deformation

load, the modulus of elasticity of the concrete used for the concrete slab was chosen as 33,000, 36,000, 40,000 and 45,000 MPa, with a constant concrete slab thickness of 275 mm and concrete compressive strength of 54 MPa. Fig. 8 demonstrates how the deflections of a concrete slab and sand layer change as the modulus of elasticity changes.

Fig. 7 shows that increasing the modulus of elasticity from 30 GPA to 33,000 MPa reduced the deflection of the concrete slab by 0.5 percent while increasing the deflection of the sand layer by 0.4 percent. As the modulus of elasticity increased from 36,000 to 40,000 MPa, the sand deflection reduced from 1.6 to 1.74 percent, respectively. The concrete deflection, on the other hand, increased from 0.53 to 0.41 percent. When the modulus of elasticity is between 45,000 and 50 MPa, the concrete deflection decreases by 1.3 to 3.0 percent. Furthermore, the sand deflection rose from 1.74 to 2.3 percent.

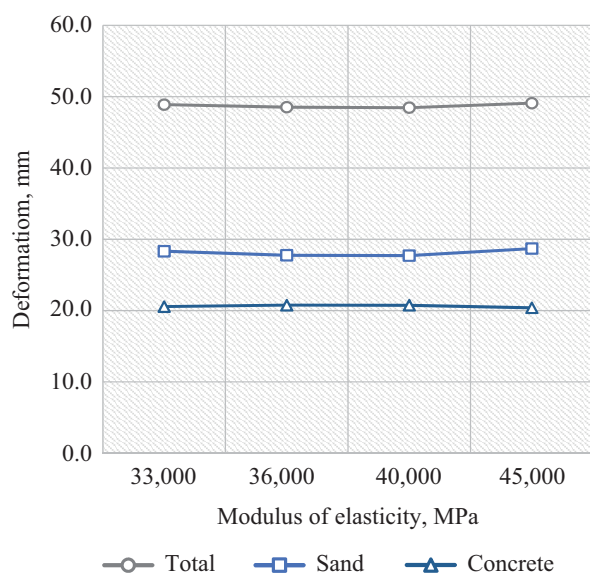


Fig. 7. Modulus of elasticity effect on the deformation

Flexure Tensile Strength

To investigate the impact of concrete flexure tensile strength on the deflection of concrete slabs under impact loading, four different flexure tensile strength values for the concrete slab were chosen: 2.7, 5.0, 10 and 15 MPa. The concrete slab's thickness was set at 275 mm. Fig. 8 shows how the deflection of the concrete slab changes with the concrete's Flexure Tensile.

The distortion of the sand layer dropped by 2.4 percent as the flexural tensile strength increased from 2.7 to 5 MPa, and by 4.7 percent when the flexural tensile strength reached 10 MPa, before progressively increasing. Furthermore, an increase in flexural tensile strength only results in a considerable reduction in concrete slab deformation. The deformation was reduced by 8.3 percent when the flexural tensile strength was increased from 2.7 to 5 MPa, and by 24.5 percent when the flexural tensile

strength was increased to 10 MPa. The concrete deflection reached 38.1 percent when the flexural tensile strength reached 15 MPa. As a result, the concrete slab's deflection was greatly reduced by the flexural tensile strength.

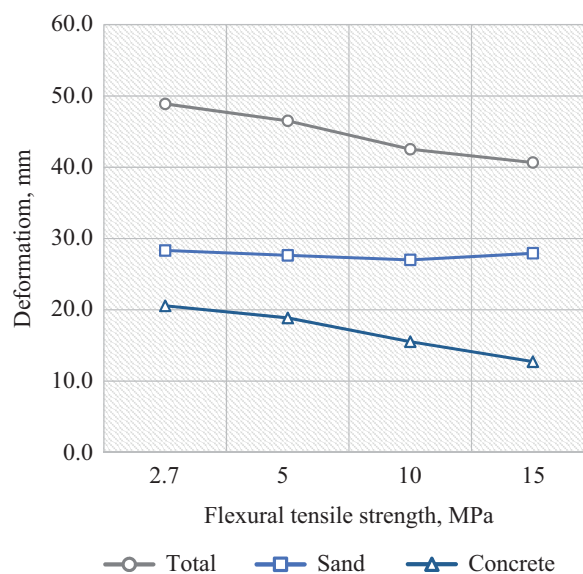


Fig. 8. Flexural tensile strength effect on the deformation of concrete slabs

Compressive Strength

To investigate the influence of concrete compressive strength on the deflection of concrete slabs under impact loading, four different compressive strength values for the concrete slab were chosen: 50, 54, 60 and 65 MPa. The concrete slab's thickness was set at 275 mm. The deflection of the concrete slab changes with the compressive strength of the concrete, as illustrated in Fig. 9.

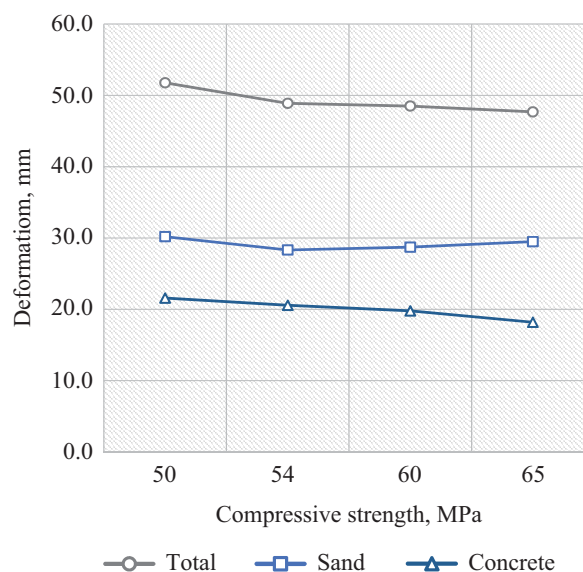


Fig. 9. Compressive strength effect on the deformation of concrete slabs

The sand layer deformed by 6.2 percent when the compressive strength climbed from 50 to 54 MPa, by 4.9 percent when the compressive strength reached 60 MPa, and by 2.3 percent when the compressive strength reached 65 MPa. Furthermore, increasing compressive strength only leads to a significant decrease in concrete slab deformation. When the compressive strength was increased from 50 to 54 MPa, the deformation was decreased by 4.7 percent, and by 8.3 percent when the compressive strength was increased to 60 MPa. When the compressive strength reached 65 MPa, the concrete deflection fell by 15.7 %. As a result, the concrete slab's compressive strength greatly reduced slab deflection.

Impact Velocity

To test how impact velocity influenced the deflection of the slab under the impact load, the impactor's impact velocity was adjusted to 4,000, 5,000, 6,000 and 7,000 mm/s for a concrete slab with a constant weight of 1,181 kg. The consistent impact weight of 181,000 kg indicates that the impactor's weight was constant regardless of impact velocity. The impactor was cylindrical and featured a hemispherical drop head. The impactor was 100 mm in diameter. Fig. 10 depicts the variation in deflection as a function of impact velocity.

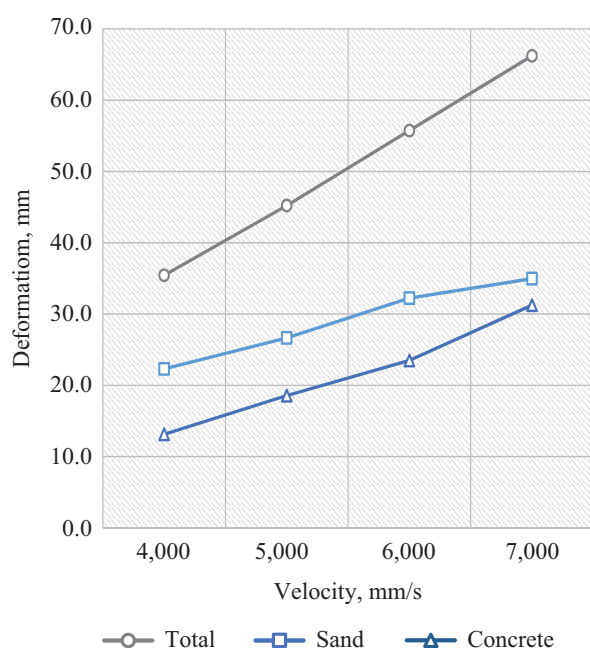


Fig. 10. Velocity effect on the deformation of concrete slabs

Fig. 10 shows that as the impact velocity increased, the deflection of the concrete slab increased in a non-linear fashion. The four impact velocities were chosen because the range was considered to be large enough to generate significant deflection. It is obvious that the low velocity has no significant deflection, however choosing a larger velocity resulted in damage to the selected specimen. The deformation of the sand layer increased by 27.6 percent when the velocity climbed from 4,000

to 5,000 mm/s, 57.2 percent when the velocity reached 6,000 mm/s, and 86.9 percent when the velocity reached 7,000 mm/s. Furthermore, increasing velocity only resulted in a considerable increase in concrete slab deformation. The deformation rose by 41.3 percent when the velocity was increased from 4,000 to 5,000 mm/s, and by 78.8 % when the velocity was increased to 6,000 mm/s. When the velocity of the concrete reached 7,000, the deflection increased by 137.8 %. As a result, the velocity of the impactor greatly increased slab deflection.

Impactor Weight

The influence of impact weight on deflection was studied using a hemispherical drop head impactor with an impact mass of 1,181 kg. The impact weights of the impactor were set at 800, 1,000, 1,200 and 1,400 kg. The impactor's velocity and other factors were held constant. The impactor's impact weights were set to produce sufficient deflection on the top surface of the concrete slab. Because the FE model of the concrete slab was validated using an impact test, the impact weight values were chosen to be close to the original impactor weight. Fig. 11 shows how the deflection varies with different impact weights.

Fig. 11 shows that as the weight of the impactor increased, so did the deflection of the concrete slab and Sand layer. When the impactor weight was increased to 1,000, 1,200 and 1,400 kg, the deformation in the sand layer rose by 9.7, 16.2 and 23.3 percent, respectively, compared to the initial position. As a result, the distortion of the concrete slab rose dramatically as compared to the starting position (800 kg). When the impactor weight was raised from 800 to 1,000 kg, 1,200 and 1,400 kg, the deformation rose by 26.3, 56.6 and 86.2 percent, respectively. This section of the paper should demonstrate the author's methodical analytical and statistical content.

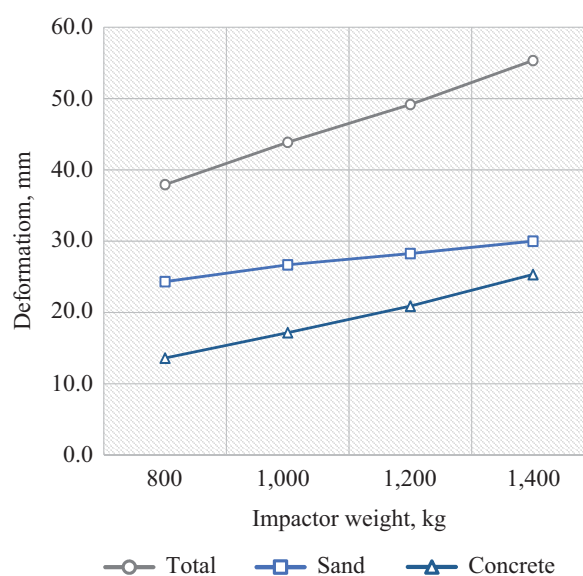


Fig. 11. Impactor weight effect on the deformation of concrete slabs

CONCLUSION AND DISCUSSION

Anslys Explicit dynamics were used to do a finite element analysis to validate the concrete pavement model under impact loads using test findings from the literature. Following validation, parametric experiments were carried out to assess the impact of several factors on the deflection of the concrete pavement under the impact load. The following are the important conclusions from the impact research of concrete pavement:

- as the thickness of the concrete slab increased, the deflection of the slab was reduced. With each mm increase in slab thickness;

- the concrete density and the modulus of elasticity have an insignificant effect on the deflection of the slab within the range used;

- the flexural tensile strength increased the deformation of the concrete slab decreased significantly;

- increasing the compressive strength of the concrete leads to a decrease in the deformation of the slab;

- the impact velocity and impactor weight were shown to have a substantial influence on the deflection of the concrete slab's top surface.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Othman H., Marzouk H. Finite-element analysis of reinforced concrete plates subjected to repeated impact loads. *Journal of Structural Engineering*. 2017; 143(9). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001852
2. Kuo S.-S., Mahgoub H.S., Holliday R.D. Pavement responses due to hard landings of heavy aircraft. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2004; 1896(1):88-95. DOI: 10.3141/1896-09
3. Al-Qadi I.L., Portas S., Coni M., Lahouar S. Runway instrumentation and response measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2010; 2153(1):162-169. DOI: 10.3141/2153-18
4. Rufino D., Roesler J. Effect of slab-base interaction on measured concrete pavement responses. *Journal of Transportation Engineering*. 2006; 132(5):425-434. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:5(425)
5. Buonsanti M., Leonardi G. A finite element model to evaluate airport flexible pavements response under impact. *Applied Mechanics and Materials*. 2011; 138-139:257-262. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.138-139.257
6. Kim M., Tutumluer E. Multiple wheel-load interaction in flexible pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2008; 2068(1):49-60. DOI: 10.3141/2068-06
7. Maitra S.R., Reddy K.S., Ramachandra L.S. Experimental evaluation of interface friction and study of its influence on concrete pavement response. *Journal of Transportation Engineering*. 2009; 135(8):563-571. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(2009)135:8(563)
8. Caliendo C., Parisi A. Stress-prediction model for airport pavements with jointed concrete slabs. *Journal of Transportation Engineering*. 2010; 136(7):664-677. DOI: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000151
9. Li W., Xu J. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 505(1-2):178-186. DOI: 10.1016/j.msea.2008.11.063
10. Wu J., Chew S.H. Field performance and numerical modeling of multi-layer pavement system subject to blast load. *Construction and Building Materials*. 2014; 52:177-188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.035
11. Ranade R., Li V.C., Heard W.F., Williams B.A. Impact resistance of high strength-high ductility concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017; 98:24-35. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.03.013
12. Ali S., Liu X., Fawzia S. Numerical study on the surface depression of the concrete runway pavement under impact load. *International Journal of Research in Civil Engineering, Architecture and Design*. 2016; 4(1):8-19.
13. Yan X., Weng X., Kou Y. Influence of fiber grid on interlayer bond property of airport double-layer pavement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014; 33(1):101-111. DOI: 10.1177/0731684413500160
14. Cao H. Experimental investigation on the static and impact behaviors of basalt fiber-reinforced concrete. *The Open Civil Engineering Journal*. 2017; 11(1):14-21. DOI: 10.2174/1874149501711010014
15. Fu Q., Niu D., Li D., Wang Y., Zhang J., Huang D. Impact characterization and modelling of basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 93:246-259. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.019
16. Fu Q., Niu D., Zhang J., Huang D., Hong M. Impact response of concrete reinforced with hybrid basalt-polypropylene fibers. *Powder Technology*. 2018; 326:411-424. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.12.022
17. Wei Y., Gao X., Wang F., Zhong Y. Nonlinear strain distribution in a field-instrumented concrete pavement slab in response to environmental effects. *Road Materials and Pavement Design*. 2019; 20(2):367-380. DOI: 10.1080/14680629.2017.1395353
18. Zhang X. Effects of base characteristics on curling stresses of continuously reinforced concrete pavements. *CICTP 2012*. 2012. DOI: 10.1061/9780784412442.323

19. Tian Y., Xiang P., Liu S., Ling J., Tang R. Improving airport runway rigid pavement design using influence surfaces. *Construction and Building Materials*. 2021; 284:122702. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122702
20. Park H.W., Kim D.H., Lee J.H., Yum W.S., Jeong J.H. Influence of mix properties of concrete slabs on the performance of airport pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Transport*. 2020; 1-11. DOI: 10.1680/jtran.19.00009
21. Wu J., Wu H., Tan H.W.A., Chew S.H. Multi-layer pavement system under blast load. *Springer Tracts in Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-5001-5
22. Riedel W., Kawai N., Kondo K. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials. *International Journal of Impact Engineering*. 2009; 36(2):283–293. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.12.012
23. Wu J., Wu H., Tan H.W.A., Chew S.H. Multi-layer pavement system under blast load. *Springer Tracts in Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-5001-5
24. Wu J., Liu X., Zhou H., Li L., Liu Z. Experimental and numerical study on soft-hard-soft (SHS) cement based composite system under multiple impact loads. *Materials & Design*. 2018; 139:234-257. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.073

Received June 6, 2022.

Adopted in revised form on June 24, 2022.

Approved for publication on September 14, 2022.

B I O N O T E S : **Hayder Abbas Ashour AlAraba** — postgraduate student of the Department of Construction; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; PhD Candidate at Civil Engineering Department, Department of Civil Engineering; **University of Kerbala**; Kerbala, Iraq; hayder@uokerbala.edu.iq;

Kharun Mahmud — Professor of the Department of Civil Engineering; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete & Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; miharun@mail.ru.

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

Поступила в редакцию 6 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 14 сентября 2022 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Хайдер Аббас Ашур АлАраза** — аспирант кафедры строительства; **Российский университет дружбы народов (РУДН)**; 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; кандидат технических наук, инженерно-строительный факультет; **Университет Кербелы**; г. Кербела, Ирак; hayder@uokerbala.edu.iq;

Харун Махмуд — профессор кафедры строительства; **Российский университет дружбы народов (РУДН)**; 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; miharun@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Гидравлические исследования напорных труб из различных материалов

Лейс Саид Абдуламир^{1,2}, Владимир Александрович Орлов¹,
Назира Тентимишова Джумагулова¹

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

² Университет Кербелы; г. Кербела, Ирак

АННОТАЦИЯ

Введение. Для устранения проблемы дефицита воды на орошение в г. Кербела (Ирак) впервые было принято решение по использованию очищенных сточных вод с городских очистных сооружений. Транспортирование воды от очистных сооружений до орошаемых земель осуществляется по трубопроводу в напорном режиме. Сравниваются результаты имитационного моделирования с использованием программы WaterCAD V8i при различных расходах в напорной системе подачи воды с результатами лабораторных исследований для трех типов материалов труб (стальная труба диаметром 100 мм с полимерным покрытием, полиэтиленовая труба диаметром 100 мм и стальная труба диаметром 100 мм с цементно-песчаным покрытием (диаметр 90 мм)). Цель работы — верификация результатов, полученных в программе WaterCAD V8i, с результатами экспериментов на различных типах труб.

Материалы и методы. Изучались характеристики потока в широких диапазонах расходов.

Результаты. Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными с помощью имитационной модели WaterCAD V8i, показали, что по гидравлическим параметрам (потери напора, коэффициенты трения) они близки по значениям, но в программе WaterCAD V8i зафиксированы более высокие значения для труб (стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием и полиэтиленовой трубы диаметром 100 мм). Отмечена высокая сходимость результатов для ряда других гидравлических параметров.

Выводы. Результаты исследования по сопоставлению экспериментальных данных с расчетными, полученными по программе WaterCAD V8i, позволяют сделать вывод о возможности широкого использования ее на практике для определения гидравлических показателей трубопроводов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дефицит воды, транспортирование воды, напорные трубы, моделирование WaterCAD V8i, лабораторное исследование, три типа материалов, характеристики потока, коэффициент корреляции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абдуламир Л.С., Орлов В.А., Джумагулова Н.Т. Гидравлические исследования напорных труб из различных материалов // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1218–1230. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1218-1230

Автор, ответственный за переписку: Лейс Саид Абдуламир, laith_eng2009@yahoo.com.

Hydraulic studies of pressure pipes made of various materials

Layth Saeed Abdulameer^{1,2}, Vladimir A. Orlov¹, Nazira T. Dzhumagulova¹

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

² University of Kerbala; Kerbala, Iraq

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of water shortage for irrigation in the city of Kerbala (Iraq), for the first time, a decision was made to use treated wastewater from urban wastewater treatment plants. Transportation of water from treatment facilities to irrigated lands is carried out through a pipeline in a pressure mode. The article compares the results of simulation modeling of WaterCAD V8i at various flow rates in a pressurized water supply system with the results of laboratory studies for three types of pipe materials (100 mm diameter steel pipe with polymer coating, 100 mm diameter polyethylene pipe and 100 mm diameter steel pipe with cement-sand coated (diameter 90 mm)). The purpose of the work is to verify the results obtained in the WaterCAD V8i program by conducting experiments for various types of pipes.

Materials and methods. During the experiment, the characteristics of the flow were studied.

Results. Comparison of the experimental results with the results obtained using the WaterCad V8i simulation model showed that the hydraulic parameters (pressure loss, friction coefficient) are close in values, but the WaterCad V8i program recorded

higher values for pipes (steel pipe with a diameter of 100 mm with a polymer coating and a polyethylene pipe with a diameter of 100 mm). The high convergence of the results for a number of hydraulic parameters can be noted.

Conclusions. The results of the work carried out by comparing the experimental data with the calculated ones obtained using the WaterCAD V8i program allow us to conclude that it can be widely used in practice to determine the hydraulic performance of pipelines.

KEYWORDS: water scarcity, water transportation, pressure pipes, WaterCAD V8i simulation, laboratory study, three types of materials, flow characteristics, correlation coefficient

FOR CITATION: Abdulameer L.S., Orlov V.A., Dzhumagulova N.T. Hydraulic studies of pressure pipes made of various materials. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1218-1230. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1218-1230 (rus.).

Corresponding author: Layth Saeed Abdulameer, laith_eng2009@yahoo.com.

ВВЕДЕНИЕ

Модель играет важную роль в проектировании, эксплуатации и управлении системами распределения воды [1–12]. В этом исследовательском моделировании используется программное обеспечение (ПО) WaterCAD V8i для анализа гидравлических параметров водопроводных труб путем расчета потерь напора, скорости и других показателей в рассматриваемых трубах. WaterCAD V8i — ПО для гидравлического моделирования, которое состоит из различных функций, включая гибкую графику и прогресс профиля. Многие функции, такие как гидравлический анализ и анализ качества воды, а также стационарное и долгосрочное моделирование, также созданы для работы с расширенными возможностя-

ми и эффективным управлением данными наряду с интеграцией AutoCAD и ГИС. Преимущества WaterCAD V8i по сравнению с другим ПО включают построение упрощенных моделей с помощью геопространственных модулей и инструментов, таких как Load Builder и TRex, моделирование качества воды, анализ потока, оптимизацию и управление сценариями. WaterCAD V8i применяется для разных типов водораспределения, а также программных пакетов моделирования, принятых для различных приложений [13–25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общий вид гидравлического стенда в виде эскиза представлен на рис. 1.

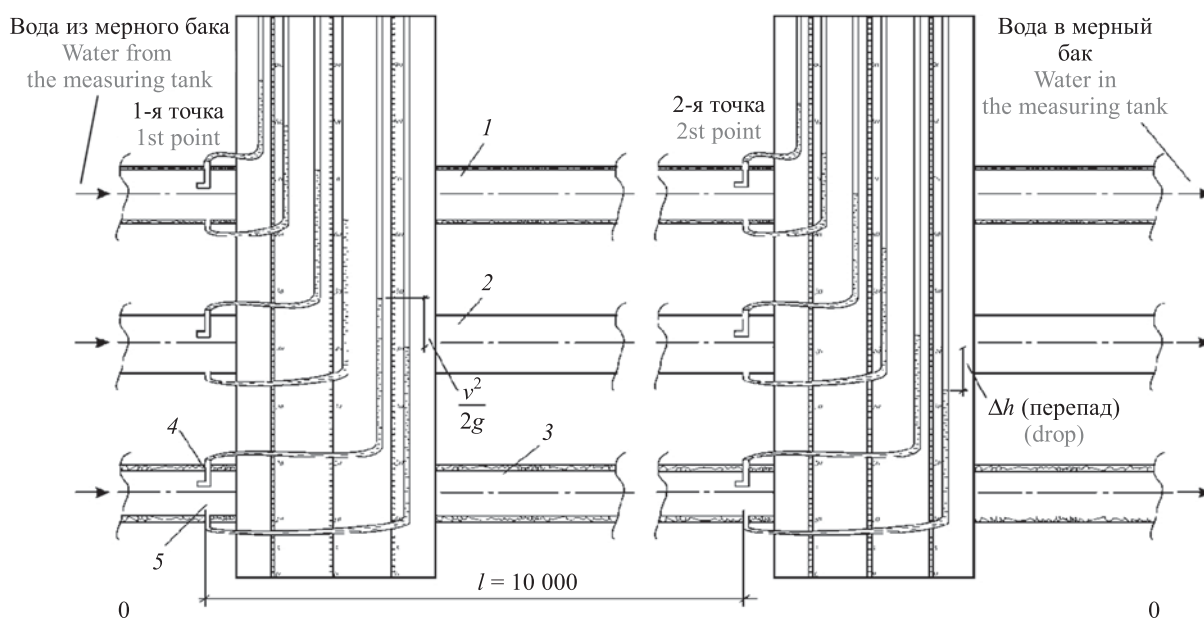


Рис. 1. Эскиз опытного гидравлического стенда: $v^2/2g$ — скоростной напор; $l = 10\,000$ — длина опытного участка трубопровода, м; Δh — разность показаний пьезометров; 1 — тонкий полимерный рукав диаметром 100 мм; 2 — полиэтиленовая труба диаметром 100 мм; 3 — стальная труба с цементно-песчаным покрытием, диаметром 100 мм (с учетом защитного слоя внутренний диаметр нового трубопровода составляет 90 мм); 4 — скоростная трубка Пито; 5 — пьезометрическая трубка; 0–0 — плоскость сравнения

Fig. 1. Sketch of an experienced hydraulic stand: $v^2/2g$ — high-speed pressure; $l = 10,000$ — the length of the experimental section of the pipeline, m; Δh — the difference in the readings of piezometers; 1 — a thin polymer sleeve with a diameter of 100 mm; 2 — a polyethylene pipe with a diameter of 100 mm; 3 — a steel pipe with a cement-sand coating with a diameter of 100 mm (taking into account the protective elephant, the inner diameter of the new pipeline is 90 mm); 4 — a high-speed Pitot tube; 5 — a piezometric tube; 0–0 — a comparison plane

Для расчета гидравлических параметров использовались следующие уравнения:

- скоростной напор (м)

$$H_{\text{ск}} = H_{\text{Пито}} - H_{\text{П}}, \quad (1)$$

где $H_{\text{Пито}}$ — показания на трубке Пито, м; $H_{\text{П}}$ — показания на пьезометре, м;

- коэффициент Кориолиса

$$\alpha_1 = 2gH_{\text{ск}} / V^2. \quad (2)$$

Применяются уравнения первой и второй точек и берется среднее:

- средняя скорость $V_{\text{ср}}$, м/с,

$$V_{\text{ср}} = Q_{\text{ср}} / \omega, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ср}}$ — расходы воды (среднее значение, м³/с); ω — живое сечение, м²;

- потери напора (м)

$$\Delta h = H_{1\text{п}} - H_{2\text{п}}; \quad (4)$$

- среднее значение коэффициента Кориолиса

$$\alpha_{\text{ср}} = \sum \alpha_n / n, \quad (5)$$

где $n = 2$ (две точки);

- коэффициент Дарси

$$\lambda = \frac{2g\Delta h d}{\alpha_{\text{ср}} V_{\text{ср}}^2}, \quad (6)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения; g — ускорение свободного падения, м/с².

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ, схема установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид гидравлического стенда с обеих сторон
Fig. 2. General view of the hydraulic stand from both sides

Исследования выполнены с использованием трех параллельных трубопроводов длиной 18 м (стальная труба диаметром 100 мм с полимерным покрытием, полиэтиленовая труба диаметром 100 мм и стальная труба диаметром 100 мм с цементно-песчаным покрытием (внутренний диаметр 90 мм)). Установка оборудована пьезометрами, насосной установкой (рис. 3, а), состоящей из двух центробежных насосов марки АЦМЛ-80А/130-3,0/2 (расход 43,2 м³/ч; напор 13, м; $n = 2900$ об/мин) с регулируемым компьютерным приводом (рис. 3, б), что позволяет автоматически регулировать расход, изменяя частоту вращения рабочего колеса от 0 до 2900 об/мин.

Гидравлический стенд снабжен также узлом измерения расхода объемным методом (рис. 4, а), включающим расположенный на торцевой части накопительной емкости мерный карман (на 100 л) с оттарированным водомерным стеклом (рис. 4, б).



а



б

Рис. 3. Насосная установка (а) и шкаф управления с компьютером (б)

Fig. 3. Pumping unit (а) and control cabinet with computer (б)



a



b

Рис. 4. Узел измерения расхода объемным методом (a) с воронкой, гибким шлангом и мерным карманом на 100 л и оттарированное водомерное стекло (b)

Fig. 4. Flow measurement unit by volumetric method (a) with funnel, flexible hose and measuring pocket for 100 l and calibrated water gauge glass (b)



Рис. 5. Фрагмент стенда с трубками Пито и пьезометрами

Fig. 5. Fragment of a stand with pitot tubes and piezometers

Для отбора статического и динамического давлений на трех трубопроводах в двух их точках на расстоянии 10 м друг от друга установлены пьезометры и трубки Пито (рис. 5): первая в 4,0 м от первого по ходу движения воды местного гидравлического сопротивления — фланца на повороте трубопровода; вторая в 4,0 м от задвижки вблизи накопительной емкости (в месте излива воды).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментальных исследований

По вышеизложенной методике произведены расчеты гидравлических характеристик потока стальной

трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием, которые представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, с увеличением расхода воды в трубе увеличиваются значения всех гидравлических параметров, кроме коэффициента гидравлического трения. Это связано с тем, что существует обратная зависимость между коэффициентом гидравлического трения и числом Рейнольдса, которое зависит от скорости потока. Зависимость между потерей напора и расходом из различных материалов изображена на рис. 6.

Стальная труба с полимерным покрытием диаметром 100 мм (рис. 6) имела наименьшие потери напора по сравнению с полиэтиленовой трубой. Также отмечено, что стальная труба диаметром 100 мм с цементно-песчаным покрытием (внутренний диаметр 90 мм) имела самые большие потери по сравнению с другими типами труб по причине меньшего диаметра и, таким образом, больших потерь напора.

Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными с помощью имитационной модели WaterCAD V8i

Для моделирования гидравлического режима трубы использовалась программа WaterCAD V8i. Это дало возможность моделировать течение воды в трубах из различных материалов. Потери напора в системе рассчитывались с помощью уравнения Дарси – Вейсбаха. Результаты эксперимента и эксплуатации программы для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием при различных расходах представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что экспериментальные и программные значения потерь напора и скоростей потока близки. Эти результаты аналогичны результатам, приведенным в работе [1], где авторами рассматриваются вопросы в период проведения двух экспериментов,

Табл. 1. Расчеты гидравлических характеристик потока стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием

Table 1. Calculations of hydraulic flow characteristics of a 100 mm diameter polymer-coated steel pipe

Давление насоса H , м Pump pressure H , m	Средний показатель расхода воды Q_{cp} , м ³ /с Average water consumption Q_{av} , м ³ /s	Средняя скорость V_{cp} , м/с Average speed V_{av} , м/с	Потери напора Δh , м Head loss Δh , m	Среднее значение коэффициента Кориолиса α_{cp} Average coefficient value Coriolis α_{av}	Коэффициент Дарси λ Darcy coefficient λ
12	0,006444	0,8209	0,05	1,163	0,0125043
12	0,00644	0,8205	0,05	1,15	0,012658
12	0,0073	0,9302	0,075	1,268	0,013398
12	0,008233	1,0488	0,093	1,443	0,0114837
12	0,008304	1,058	0,1024	1,268	0,0141403
12	0,00868	1,106	0,118	1,402	0,01348
12	0,00862	1,098	0,116	1,357	0,013897
12	0,006698	0,853	0,0560	1,3026	0,0115806
12	0,00671	0,854	0,0565	1,343	0,0113059
12	0,006796	0,865	0,068	1,218	0,0146245
12	0,006801	0,866	0,059	1,2283	0,0125534
12	0,006873	0,8755	0,064	1,2184	0,0134316
12	0,006929	0,88275	0,05	1,245	0,010101
12	0,008707	1,109	0,1175	1,2432	0,015062
12	0,0087391	1,1132	0,115	1,52235	0,0119478
12	0,008733	1,11217	0,120	1,533	0,0124036

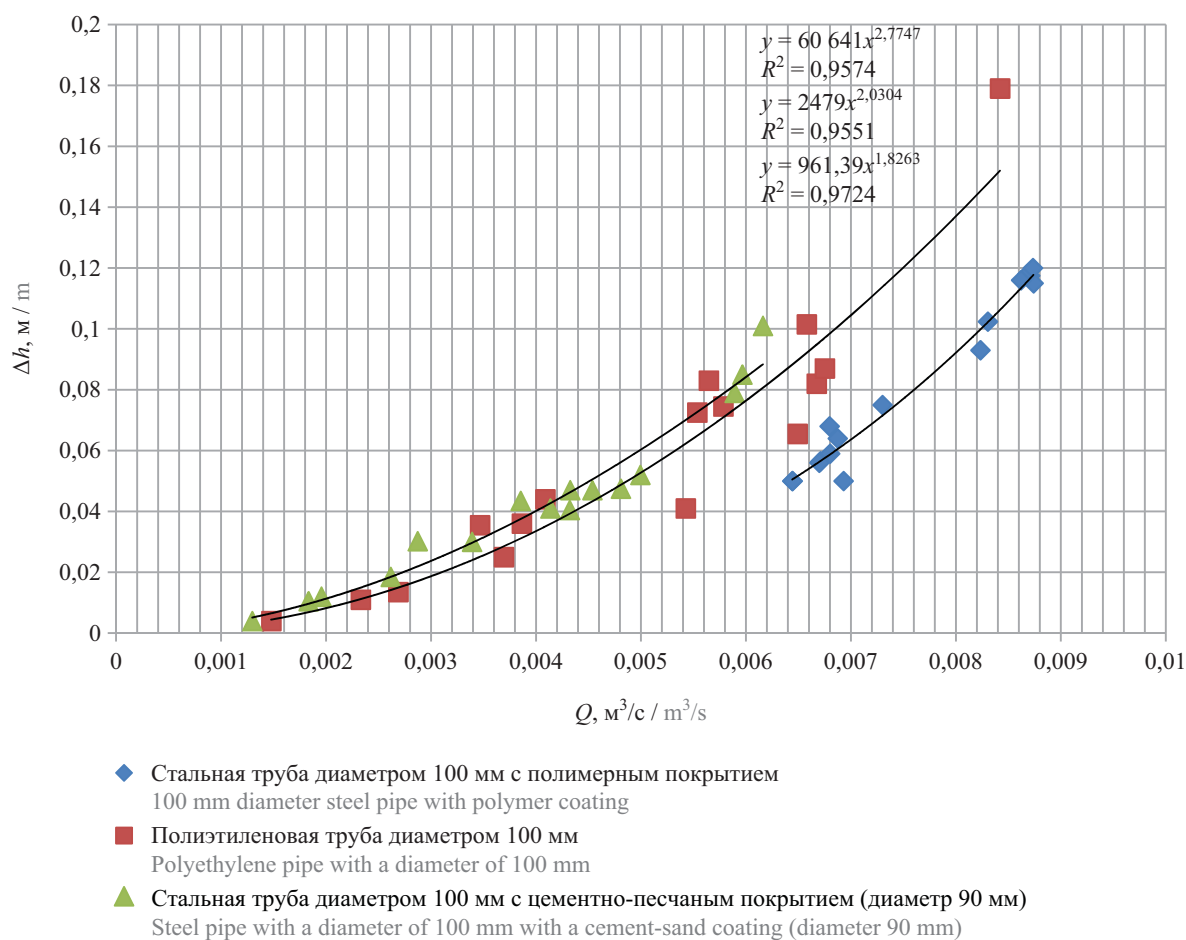


Рис. 6. Зависимость между потерей напора и расходом для различных материалов

Fig. 6. Relationship between head loss and flow for different materials

Табл. 2. Результаты эксперимента и эксплуатации программы для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием при различных расходах**Table 2.** The results of the experiment and operation of the program for a 100 mm diameter steel pipe with a polymer coating at various costs

Расходы воды Q , м ³ /с Discharge water Q , m ³ /s	Потери напора (эксперимент) Δh , м Head loss (experiment) Δh , m	Потери напора Δh WaterCAD V8i, м Head loss Δh WaterCAD V8i, m	Средняя скорость (эксперимент) V_{cp} , м/с Average velocity experiment V_{av} , m/s	Скорость WaterCAD V8i V , м/с Velocity WaterCAD V8i V , m/s
0,00644	0,05	0,0689	0,8205	0,82
0,006698	0,056	0,0741	0,853	0,8528
0,00671	0,0565	0,0743	0,854	0,8543
0,006929	0,06	0,0789	0,88275	0,8822
0,0073	0,075	0,0868	0,9302	0,9295
0,008233	0,093	0,1084	1,0488	1,0483
0,00862	0,116	0,1181	1,098	1,0975
0,008707	0,1175	0,1203	1,109	1,1086
0,008733	0,12	0,12	1,11217	1,1119
0,0087391	0,115	0,1211	1,1132	1,1127

а именно: эксперимента с использованием ручного манометра в лаборатории с большим разнообразием диаметров и типов водопроводных труб (гладких и шероховатых) и экспериментами с применением ПО WaterCAD V8i. При этом полученные значения скорости и потерь напора аппроксимируются, т.е. имеют прямую положительную связь как со скоростью, так и со значением потерь напора, полученным методом экспериментов. Ограничением указанного выше исследования является то, что диаметры используемых труб малы (3,9; 7,5; 12,5; 17 и 18,5 мм).

Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными с помощью имитационной модели WaterCAD V8i для потерь напора, представлено на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что потери напора в программе WaterCAD V8i были несколько выше, чем при экспериментальных исследованиях, а при увеличении расхода результаты практически идентичны. Зависимость между экспериментальной потерей напора и имитационной модели WaterCAD V8i показана на рис. 8.

Следует отметить, что коэффициент корреляции составил $R^2 = 0,9869$, что указывает на высокую сходимость результатов. Измеренные и рассчитанные коэффициенты потерь на трение при различных числах Рейнольдса представлены на рис. 9.

Согласно рис. 9, результаты расчета числа Рейнольдса соответствуют турбулентному режиму течения воды. Необходимо заметить, что в программе заложено уравнение Кольбука – Уайта для расчета коэффициента гидравлического трения, а в лабораторных исследованиях для расчета коэффициента гидравлического трения использовано уравнение Дарси – Вейсбаха и коэффициент Кориолиса. Это и является причиной расхождения в результатах.

Представленные результаты аналогичны результатам, полученным в работе [2], в которой авторы рассматривают вопросы, связанные с гидравлическим экспериментом и потерями на трение, где коэффициенты оценивались с использованием шести различных чисел Рейнольдса. В итоге разница между измеренными и рассчитанными коэффициентами потерь на трение становятся значимыми, когда число Рейнольдса уменьшается менее чем на 2000 для ламинарного потока. Взаимосвязь между экспериментальным коэффициентом гидравлического трения и имитационной моделью WaterCAD V8i приведена на рис. 10.

Заметим, что коэффициент корреляции $R^2 = 0,9057$. Это указывает на высокую сходимость результатов. Результаты эксперимента и работы программы для полиэтиленовой трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием при различных расходах приведены в табл. 3.

Из табл. 3 очевидно, что экспериментальные и программные значения потерь напора имеют незначительное расхождение, связанное с использованием формул различных авторов, а скорости потока — почти одинаковые значения. Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными с помощью имитационной модели WaterCAD V8i для потери напора, представлено на рис. 11.

Из рисунка видно, что потери напора, полученные в программе WaterCAD V8i, были несколько выше, чем при экспериментальных исследованиях. Зависимость между экспериментальными значениями потерь напора и имитационной модели WaterCAD V8i показана на рис. 12.

Коэффициент корреляции $R^2 = 0,9559$. Это указывает на высокую сходимость результатов.

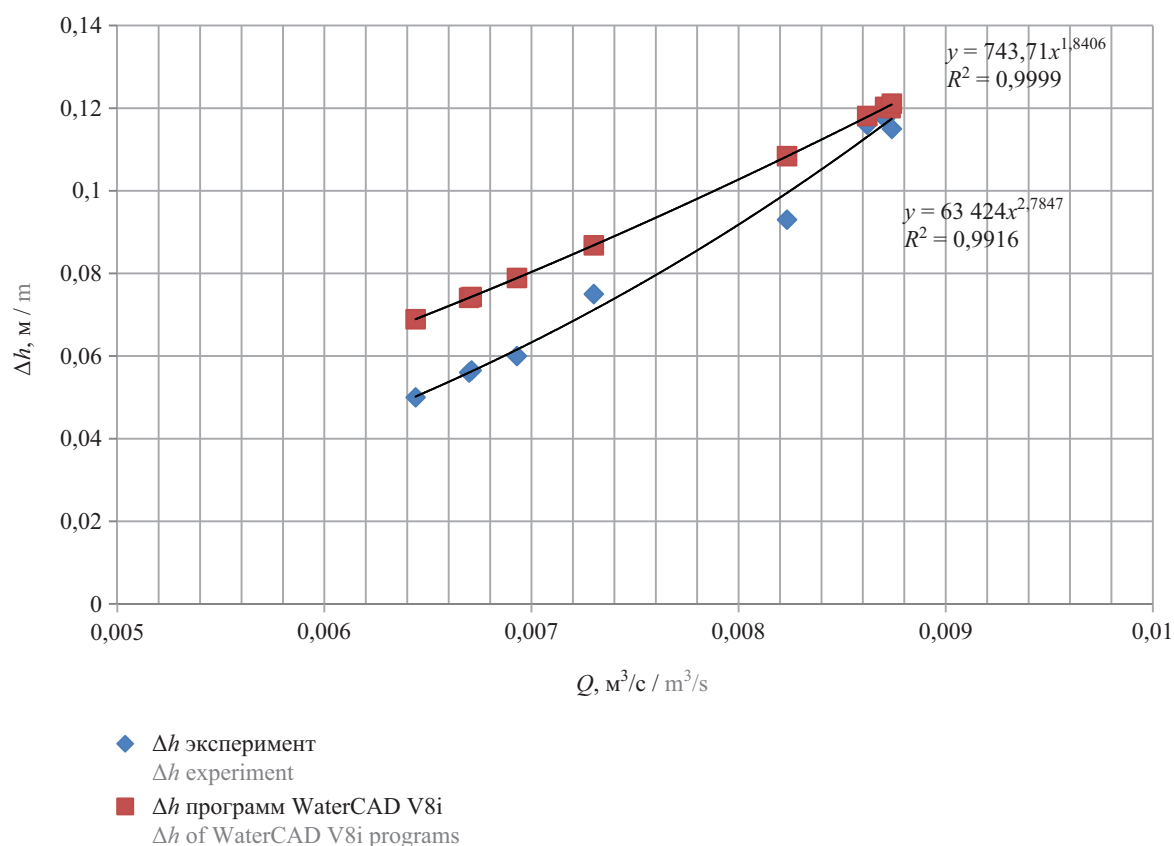


Рис. 7. Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными с использованием имитационной модели WaterCAD V8i для потерь напора

Fig. 7. Comparison of experimental results with results obtained using the WaterCAD V8i head loss simulator

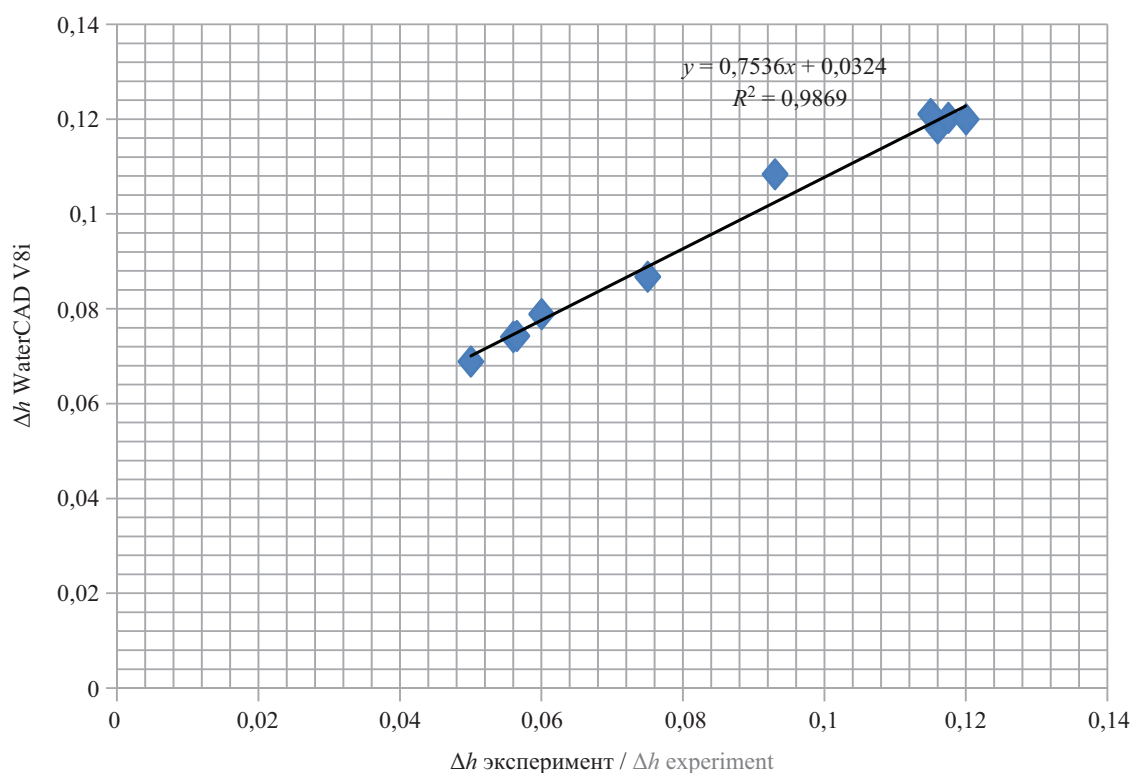


Рис. 8. Зависимость между экспериментальными значениями потерь напора и имитационной модели WaterCAD V8i

Fig. 8. Relationship between experimental head loss values and WaterCAD V8i simulation model

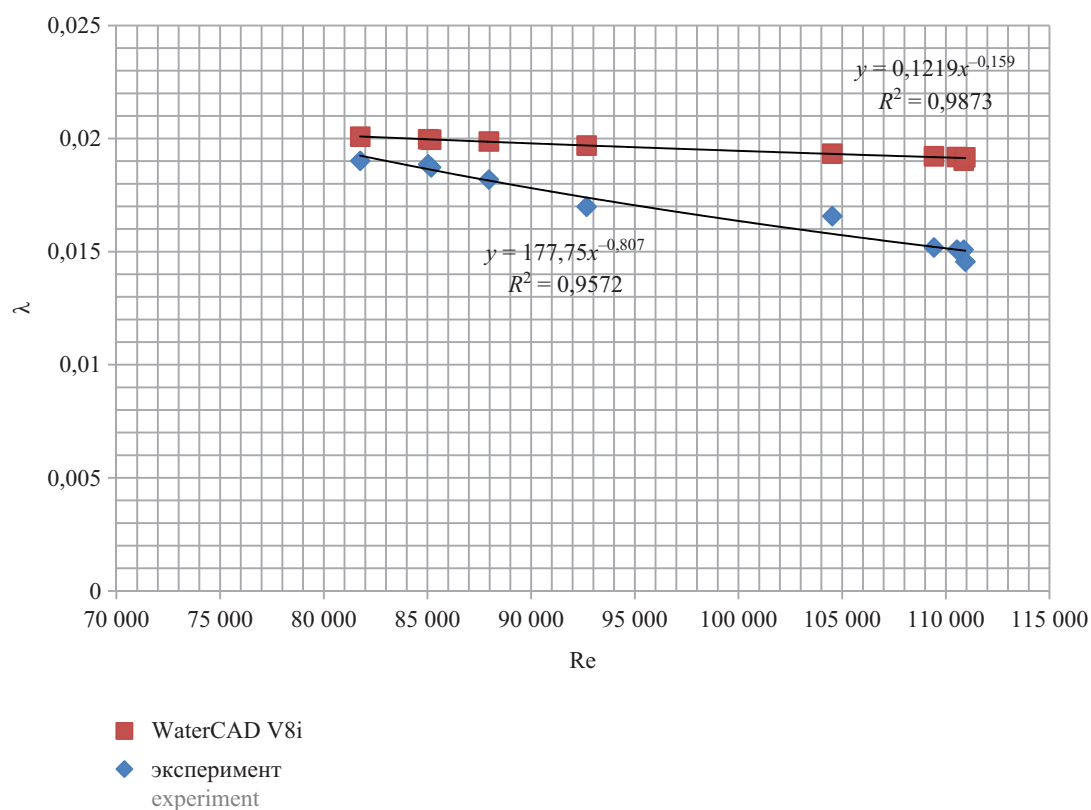


Рис. 9. Зависимость между коэффициентом гидравлического трения и числом Рейнольдса

Fig. 9. Relationship between hydraulic friction coefficient and Reynolds number

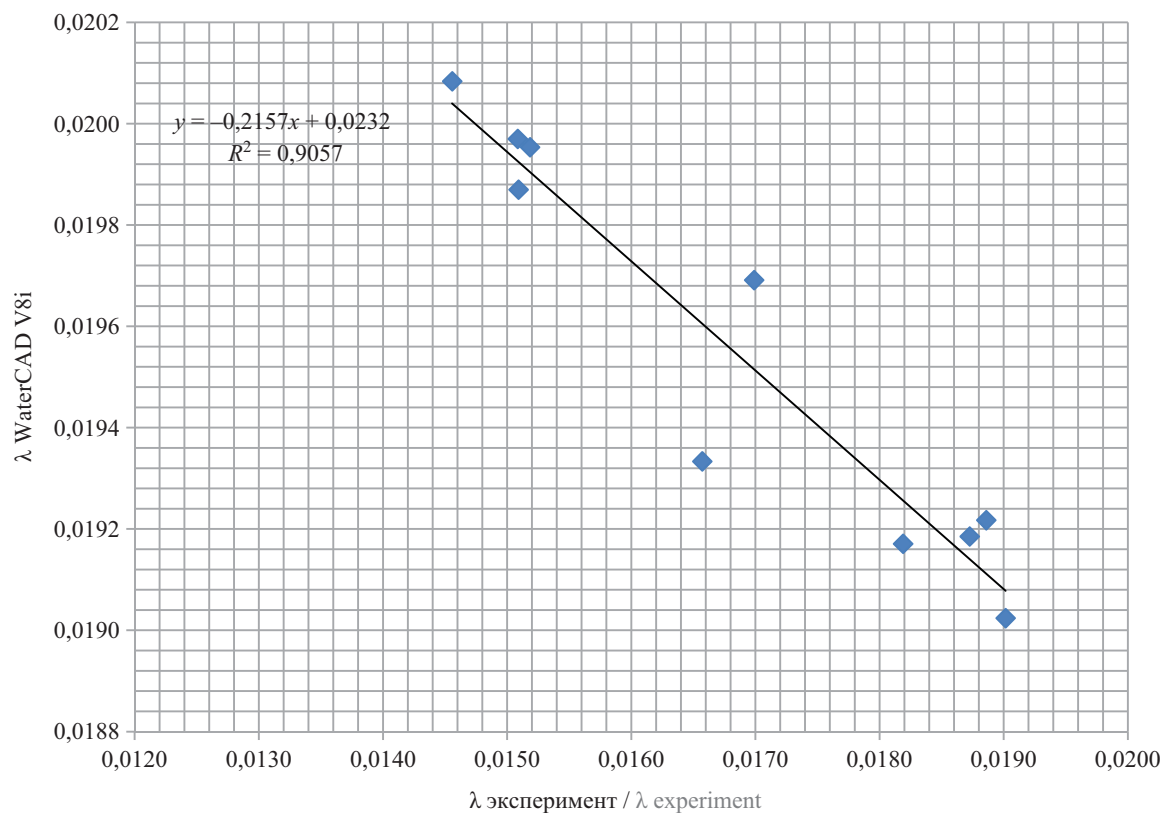


Рис. 10. Взаимосвязь между экспериментальным коэффициентом гидравлического трения и имитационной моделью WaterCad V8i

Fig. 10. Relationship between Experimental Hydraulic Friction Coefficient and WaterCad V8i Simulation Model

Табл. 3. Результаты эксперимента и работы программы для полиэтиленовой трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием при различных расходах

Table 3. The results of the experiment and the work of the program for a polyethylene pipe with a diameter of 100 mm with a polymer coating at various costs

Расходы воды Q , м ³ /с Discharge water Q , м ³ /с	Потери напора Δh (эксперимент), м Head loss Δh (experiment), m	Потери напора Δh WaterCAD V8i, м Head loss Δh WaterCAD V8i, m	Средняя скорость (эксперимент) V_{cp} , м/с Average velocity (experiment) V_{av} , м/с	Скорость WaterCAD V8i V , м/с Velocity WaterCAD V8i V , m/s
0,001477	0,004	0,0047	0,18825	0,18806
0,0023305	0,011	0,0205	0,296878	0,2968
0,0036938	0,025	0,0507	0,470547	0,47031
0,003865	0,036	0,0556	0,49236	0,49211
0,0040884	0,044	0,0621	0,520815	0,52055
0,005426	0,065	0,1086	0,69122	0,69086
0,005646	0,083	0,1174	0,719337	0,71887
0,0066738	0,085	0,1637	0,8501656	0,84973
0,0067506	0,087	0,1674	0,859949	0,85951
0,0084201	0,179	0,2598	1,07264	1,07208

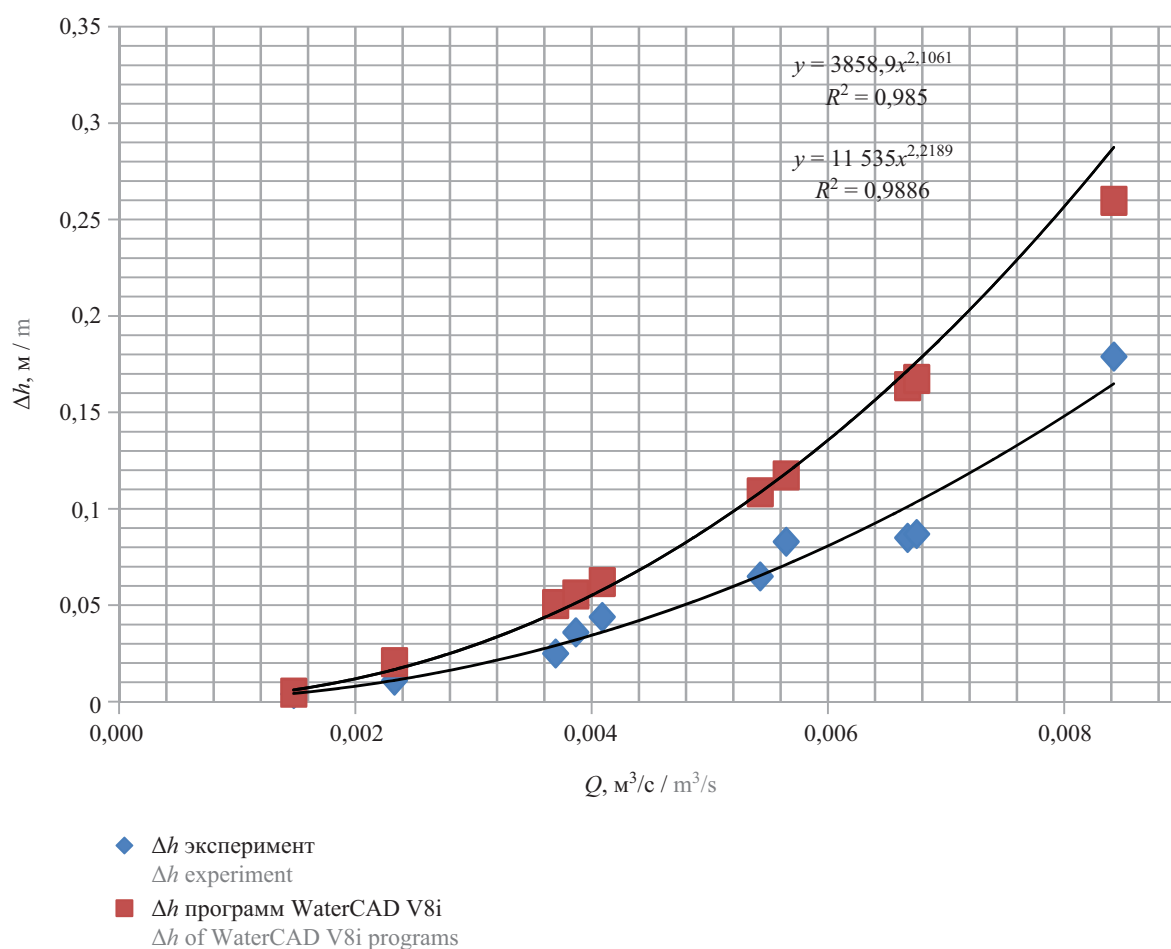
**Рис. 11.** Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными с использованием имитационной модели WaterCAD V8i для потерь напора

Fig. 11. Comparison of experimental results with results obtained using the WaterCAD V8i head loss simulator

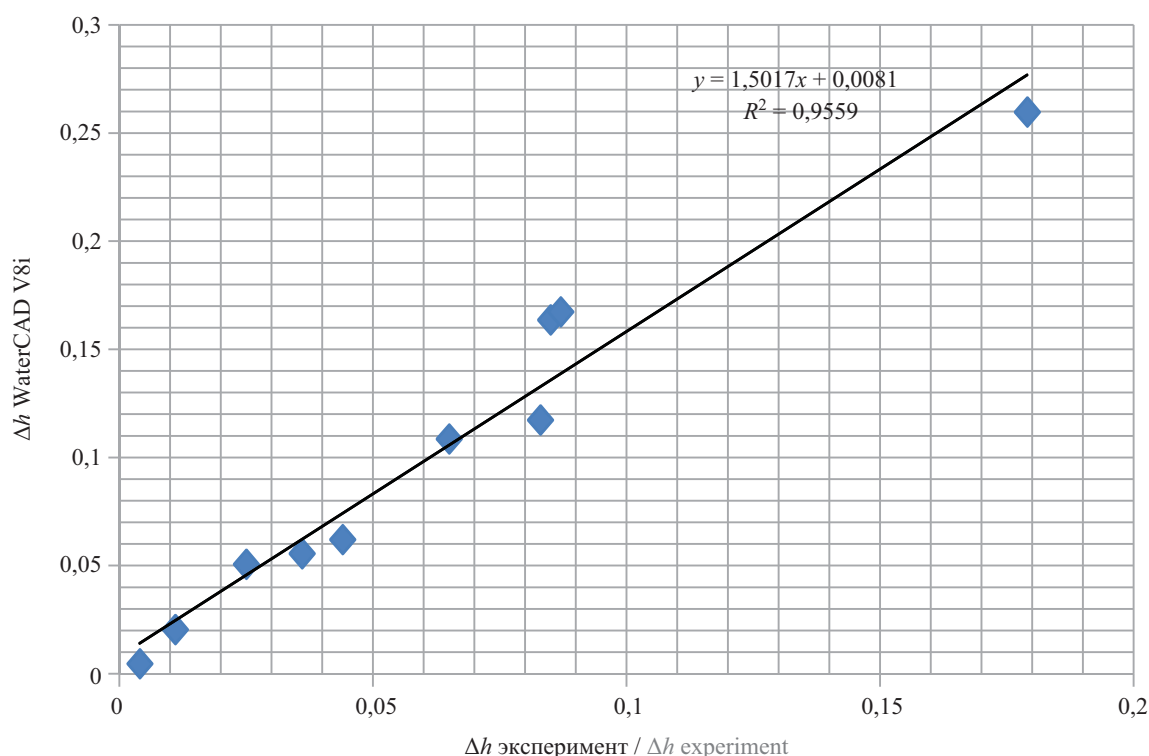


Рис. 12. Зависимость между экспериментальной потерей напора и имитационной модели WaterCAD V8i

Fig. 12. Relationship between Experimental Head Loss and WaterCAD V8i Simulation Model

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено аналитическое сравнение результатов лабораторных гидравлических исследований с результатами, полученными с помощью имитационной модели WaterCAD V8i для труб из различных материалов.

Результаты сравнения экспериментальных исследований гидравлических параметров для средних скоростей потока и полученных с помощью имитационной модели WaterCAD V8i практически идентичны.

Значения коэффициента гидравлического трения для всех трех исследуемых типов труб, полученные с помощью имитационной модели, оказались выше, чем экспериментальные значения из-за использования в расчетах формул разных авторов; при этом корреляционная кривая указывает на хорошую сходимость полученных значений.

Результаты проведенной работы по сопоставлению экспериментальных данных с расчетными, полученными по программе WaterCAD V8i, позволяют сделать вывод о возможности широкого использования ее на практике для определения гидравлических показателей трубопроводов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Iqbal M.T.* Determining energy loss due to roughness of pipe walls in piping systems with WATERCAD V8i // *Civil Engineering Journal*. 2015. Issue 1. Pp. 32–39.
2. *Kima J.H., Kwona S.H., Yoonb K.S., Leeb D.H., Chunga G.* Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. Pp. 773–778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582
3. *Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S.* Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 448. Issue 1. P. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
4. *Agunwamba J.C., Ekwule O.R., Nnaji C.C.* Performance evaluation of a municipal water distribution system using WaterCAD and EPANET // *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*. 2018. Vol. 8. Issue 3. Pp. 459–467. DOI: 10.2166/wash-dev.2018.262
5. *Bhaskar S.P., Dr. More Ashok B., Rout A.K., Rajendra G.M.* Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems Software //

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2017. Vol. 6. Issue 7. DOI: 10.15680/IJIRSET.2017.0607132

6. Achour B., Amara L. New formulation of the Darcy-Weisbach friction factor // Larhyss Journal. 2020. Vol. 43. Pp. 13–22.

7. Jamil R., Mujeebu M.A. Empirical relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for cold and hot water flow in plastic pipes // Water. 2019. Vol. 10. Pp. 104–114. DOI: 10.14294/WATER.2019.1

8. Kuok K.K., Chiu P.C., Chee D., Ting M. Evaluation of “C” values to head loss and water pressure due to pipe aging: Case study of Uni-Central Sarawak // Journal of Water Resource and Protection. 2020. Vol. 12. Issue 12. Pp. 1077–1088. DOI: 10.4236/jwarp.2020.1212064

9. Niazkar M., Afzali S. Analysis of water distribution networks using MATLAB and Excel spreadsheet: h-based methods // Computer Applications in Engineering Education. 2017. Vol. 25. Issue 1. Pp. 129–141. DOI: 10.1002/cae.21786

10. Çoban M.T. Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-white equation for the calculation of pressure drop in pipes // Journal of Naval Sciences and Engineering. 2012. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–13.

11. Arunjyoti S., Senapati S.C., Sirisha A. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems // African Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 11. Issue 8. Pp. 683–692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648

12. Cafaro V.G., Cafaro D.C., Cerda J. Improving the mathematical formulation for the detailed scheduling of refined products pipelines by accounting for flow rate dependent pumping costs // Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. 2013. Vol. 5. Issue 10. Pp. 115–128. DOI: 10.13084/2175-8018.v05n10a09

13. Hashemi S., Fillion Y., Speight V., Long A. Effect of pipe size and location on water-main head loss in water distribution systems // Journal of Water Resources Planning and Management. 2020. Vol. 146. Issue 6. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001222

14. Cabrera E., Gómez E., Cabrera Jr.E., Soriano J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems // Water. 2018. Vol. 10. Issue 6. Pp. 763. DOI: 10.3390/w10060763

15. Berhane T.G., Aregaw T.T. Optimization of water distribution system using watergems: The case of Wukro Town, Ethiopia // Civil and Environmental Research. 2020. Vol. 12. Issue 6. DOI: 10.7176/CER/12-6-01

16. Michalos C. Consequences of under-estimating friction losses in wastewater forcemains // Pipelines 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784483213.002

17. Mahar P.S., Singh R.P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2014. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000157

18. Asim T., Mishra R., Kollar L.E., Pradhan S.R. Optimal sizing and life-cycle cost modelling of pipelines transporting multi-sized solid-liquid mixtures // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 113. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.11.003

19. Martin-Candilejo A., Santillán D., Iglesias A., Garrote L. Optimization of the design of water distribution systems for variable pumping flow rates // Water. 2020. Vol. 12. Issue 2. P. 359. DOI: 10.3390/w12020359

20. Абдуламир Л.С., Джумагулова Н.Т. Технико-экономическое обоснование выбора параметров труб и системы транспортировки сточных вод для орошения на примере административного города Кербела (Ирак) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 81–89. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/81-89

21. Abdulameer L.S., Dzhumagulova N., Algretawee H., Zhuravleva L., Alshammari M.H. Comparison between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala city, Iraq // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1. Issue 1 (115). Pp. 36–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251385

22. Micheal A.M. Irrigation theory and practice. New Delhi, Vikas Publishers, 1998. Pp. 279–282.

23. Bello A.D., Alayande W.A., Otun J., Ismail A., Lawan U.F. Optimization of the designed water distribution system using MATLAB // International Journal of Hydraulic Engineering. 2015. Vol. 4. Issue 2. Pp. 37–44. DOI: 10.5923/j.ijhe.20150402.03

24. Зуйков А.Л. Гидравлика : в 2 т. Т. 2. Напорные и открытые потоки. Гидравлика сооружений : учебник. М. : МГСУ, 2015.

25. Гуринович А.Д., Бойцов В.Г. Методологические подходы анализа состояния и перспектив развития систем водоснабжения городов с использованием информационных технологий // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2018. № 2 (110). С. 100–104.

Поступила в редакцию 28 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 августа 2022 г.

Одобрена для публикации 30 августа 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Лейс Санд Абдуламир — аспирант кафедры гидравлики и гидротехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337,

г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель кафедры нефтяной инженерии; **Университет Кербелы**; г. Кербела, Ирак; РИНЦ ID: 1063894; laith_eng2009@yahoo.com;

Владимир Александрович Орлов — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 507689; OrlovVA@mgsu.ru;

Назира Тентимишовна Джумагулова — доктор технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидро-техники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; dnazira@rambler.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Iqbal M.T. Determining energy loss due to roughness of pipe walls in piping systems with WATERCAD V8i. *Civil Engineering Journal*. 2015; 1:32-39.
2. Kima J.H., Kwona S.H., Yoonb K.S., Leeb D.H., Chunga G. Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe. *Procedia Engineering*. 2016; 154:773-778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582
3. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution sub-urban area in Mranggen, Semarang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 448(1):012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
4. Agunwamba J.C., Ekwule O.R., Nnaji C.C. Performance evaluation of a municipal water distribution system using WaterCAD and EPANET. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*. 2018; 8(3):459-467. DOI: 10.2166/washdev.2018.262
5. Bhaskar S.P., Dr. More Ashok B., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems software. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(7). DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132
6. Achour B., Amara L. New formulation of the Darcy-Weisbach friction factor. *Larhyss Journal*. 2020; 43:13-22.
7. Jamil R., Mujeebu M.A. Empirical relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for cold and hot water flow in plastic pipes. *Water*. 2019; 10:104-114. DOI: 10.14294/WATER.2019.1
8. Kuok K.K., Chiu P.C., Chee D., Ting M. Evaluation of "C" values to head loss and water pressure due to pipe aging: Case study of Uni-Central Sarawak. *Journal of Water Resource and Protection*. 2020; 12(12):1077-1088. DOI: 10.4236/jwarp.2020.1212064
9. Niazkar M., Afzali S. Analysis of water distribution networks using MATLAB and Excel spreadsheet: h-based methods. *Computer Applications in Engineering Education*. 2017; 25(1):129-141. DOI: 10.1002/cae.21786
10. Çoban M.T. Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-White equation for the calculation of pressure drop in pipes. *Journal of Naval Sciences and Engineering*. 2012; 8(1):1-13.
11. Arunjiyoti S., Senapati S.C., Sirisha A. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research*. 2016; 11(8):683-692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648
12. Cafaro V.G., Cafaro D.C., Cerda J. Improving the mathematical formulation for the detailed scheduling of refined products pipelines by accounting for flow rate dependent pumping costs. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. 2013; 5(10):115-128. DOI: 10.13084/2175-8018.v05n10a09
13. Hashemi S., Filion Y., Speight V., Long A. Effect of pipe size and location on water-main head loss in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2020; 146(6). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001222
14. Cabrera E., Gómez E., Cabrera Jr.E., Soriano J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. *Water*. 2018; 10(6):763. DOI: 10.3390/w10060763
15. Berhane T.G., Aregaw T.T. Optimization of water distribution system using WaterGEMS: The Case of Wukro Town, Ethiopia. *Civil and Environmental Research*. 2020; 12(6). DOI: 10.7176/CER/12-6-01
16. Michalos C. Consequences of under-estimating friction losses in wastewater forcemains. *Pipelines* 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784483213.002
17. Mahar P.S., Singh R.P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2014; 5(1). DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000157
18. Asim T., Mishra R., Kollar L.E., Pradhan S.R. Optimal sizing and life-cycle cost modelling of pipelines transporting multi-sized solid-liquid mixtures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2014; 113:40-48. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.11.003
19. Martin-Candilejo A., Santillán D., Iglesias A., Garrote L. Optimization of the design of water distribution systems for variable pumping flow rates. *Water*. 2020; 12(2):359. DOI: 10.3390/w12020359

20. Abdulameer L.S., Dzhumagulova N. Feasibility study of the choice of pipe parameters and wastewater transportation system for irrigation on the example of the administrative district of Kerbala (Iraq). *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021; 49:81-89. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/81-89. (rus.).
21. Abdulameer L.S., Dzhumagulova N., Algre-tawee H., Zhuravleva L., Alshammari M.H. Comparison between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala city, Iraq. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 1(1):(115):36-43. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251385
22. Micheal A.M. *Irrigation Theory and Practice*. New Delhi, Vikas Publishers, 1998; 279-282.
23. Bello A.D., Alayande W.A., Otun J., Ismail A., Lawan U.F. Optimization of the designed water distribution system using MATLAB. *International Journal of Hydraulic Engineering*. 2015; 4(2):37-44. DOI: 10.5923/j.ijhe.20150402.03
24. Zuykov A.L. *Hydraulics : in 2 volumes. Vol. 2. Pressure and open flows. Hydraulics of structures : textbook*. Moscow, MGSU, 2015. (rus.).
25. Gurinovich A.D., Boytsov V.G. Methodological approaches to the analysis of the state and prospects for the development of water supply systems for cities using information technology. *Bulletin of the Brest State Technical University. Water Management Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology*. 2018; 2(110):100-104. (rus.).

Received July 28, 2022.

Adopted in revised form on August 17, 2022.

Approved for publication on August 30, 2022.

B I O N O T E S : **Layth Saeed Abdulameer** — 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; Lecturer of the Department of Petroleum Engineering; **University of Kerbala**; Kerbala, Iraq; ID RISC: 1063894; laith_eng2009@yahoo.com;

Vladimir A. Orlov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 507689; OrlovVA@mgsu.ru;

Nazira T. Dzhumagulova — Doctor 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; dnazira@rambler.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / REASERCH PAPER

УДК 627.81

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1231-1239

Алгоритмы автоматизации расчета характеристик водных объектов на примере Волго-Ахтубинской поймы

Сергей Евстафьевич Беднарук¹, Алина Валерьевна Мاستрюкова²,
Виталий Викторович Чуканов²

¹ Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия;

² Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Важнейшей и наиболее сложной из задач, решаемых при управлении Волжско-Камским каскадом, является организация и выполнение специального весеннего попуска, осуществляемого ежегодно в интересах сельского и рыбного хозяйства Нижней Волги. Использование математических моделей для расчета движения воды по Волго-Ахтубинской пойме позволяет повысить эффективность решения указанной задачи. Однако реально функционирующие в настоящее время математические гидродинамические модели Нижней Волги не обладают необходимой точностью и быстродействием. В качестве решения данной проблемы намечено создание алгоритма моделирования движения водных масс, сочетающего использование номограмм динамических объемов и танковой модели. На первом этапе должны быть получены характеристики водоемов и водотоков, образующих водную систему Нижней Волги.

Материалы и методы. Материалами для выполнения работ служили растровая цифровая модель рельефа с плановым разрешением 30 м, полученная по данным дистанционного зондирования Земли. Алгоритмы определения положения и границ водных объектов и расчета их характеристик реализованы на языке программирования Фортран. **Результаты.** Приведено описание алгоритмов сглаживания цифровой модели рельефа, поиска локальных минимумов и определения границ пойменных емкостей, разработанных с целью подготовки информационных структур, предназначенных для использования в создаваемой математической модели водной системы с развитой сетью пойменных водотоков и водоемов на примере Волго-Ахтубинской поймы. Показаны результаты испытания разработанных алгоритмов.

Выводы. Результаты работы алгоритмов поиска локальных минимумов на цифровой модели рельефа и определения положения и границ пойменных емкостей позволяют перейти к следующим этапам работы: расчету характеристик водных объектов, построению графа модели, разработке системы хранения данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волжско-Камский каскад, Волго-Ахтубинская пойма, специальный весенний попуск, цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, номограммы динамических объемов, танковая модель

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0003 государственного задания ИВП РАН.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беднарук С.Е., Мастрюкова А.В., Чуканов В.В. Алгоритмы автоматизации расчета характеристик водных объектов на примере Волго-Ахтубинской поймы // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1231–1239. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1231-1239

Автор, ответственный за переписку: Виталий Викторович Чуканов, 4yk@vodinfo.ru.

Automation algorithms for water bodies characteristics calculation on the example of the Volga-Akhtuba floodplain

Sergey E. Bednaruk¹, Alina V. Mastryukova², Vitaliy V. Chukanov²

¹ Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev); Moscow, Russian Federation;

² Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Organization and implementation of a special spring release, carried out annually in the interests of the agriculture and fisheries of the Lower Volga, is the most important and complex problem of the Volga-Kama cascade management. The way to increase the efficiency of solving this problem is to use of mathematical models for calculating the movement of water along the Volga-Akhtuba floodplain. However, the currently functioning mathematical hydrodynamic models of the Lower Volga do not provide enough accuracy and speed. It is planned to create an algorithm for modeling the movement of water masses, combining the use of nomograms of dynamic volumes and a tank model. The characteristics of water bodies and streams that form the water system of the Lower Volga should be obtained at the first stage.

Materials and methods. The materials for the work were a raster digital elevation model with 30 m resolution, obtained from Earth remote sensing data. Algorithms for determining the position and boundaries of water bodies and calculating their characteristics are implemented in the Fortran programming language.

Results. The description of algorithms of smoothing the digital elevation model, searching for local minima, and determining the boundaries of floodplain reservoirs developed to prepare information structures using in the created mathematical model of a water system with a developed network of floodplain streams and lakes is given on the example of the Volga-Akhtuba floodplain. The results of testing the developed algorithms are shown.

Conclusions. The results of the algorithms for searching for local minima on the digital elevation model and determining the position and boundaries of floodplain reservoirs make it possible to calculate the characteristics of water bodies, building a model graph, and developing a data storage system at the next stages of work.

KEYWORDS: Volga-Kama cascade, Volga-Akhtuba floodplain, special spring water release, digital elevation model, Earth remote sensing data, nomograms of dynamic volumes, tank model

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2022-0003 of the State Assignment of the Institute of Water Problems RAS.

FOR CITATION: Bednaruk S.E., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Automation algorithms for water bodies characteristics calculation on the example of the Volga-Akhtuba floodplain. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1231-1239. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1231-1239 (rus.).

Corresponding author: Vitaliy V. Chukanov, 4yk@vodinfo.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С 2018 г. Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН) по заказу Федерального агентства водных ресурсов проводит работы по расчетному обоснованию режимов работы всех водохранилищ Волжско-Камского каскада. В составе указанных работ важнейшей и наиболее сложной из решаемых задач является организация и выполнение специального весеннего пуща через замыкающий каскад Волгоградского гидроузла, осуществляемого ежегодно в интересах сельского и рыбного хозяйства Нижней Волги. Разрабатываемый для этого график специального пуща в качестве первоочередной цели должен обеспечить оптимальные в складывающихся конкретных для каждого года гидрологических и водохозяйственных условиях наложение пойменных водоемов и режим уровней

воды в основных водотоках Волго-Ахтубинской поймы и в дельте Волги [1, 2]. Эффективное решение подобных задач невозможно без использования математических моделей [3–6].

Реально функционирующие в настоящее время математические гидродинамические модели Нижней Волги основываются либо на принципе «черного ящика» [7–9], либо на решении системы уравнений Сен-Венана в одномерной постановке [10, 11]. Такие модели обеспечивают только расчет уровней воды по основному руслу Нижней Волги и не учитывают в полной мере аккумуляцию и потери стока в многочисленных пойменных озерах и ериках, не позволяют оперативно контролировать их водный режим и, соответственно, оперативно корректировать режим осуществления спецпуща. При этом даже если максимальные уровни воды по основным створам на главном русле Волги рассчитываются с удовлет-

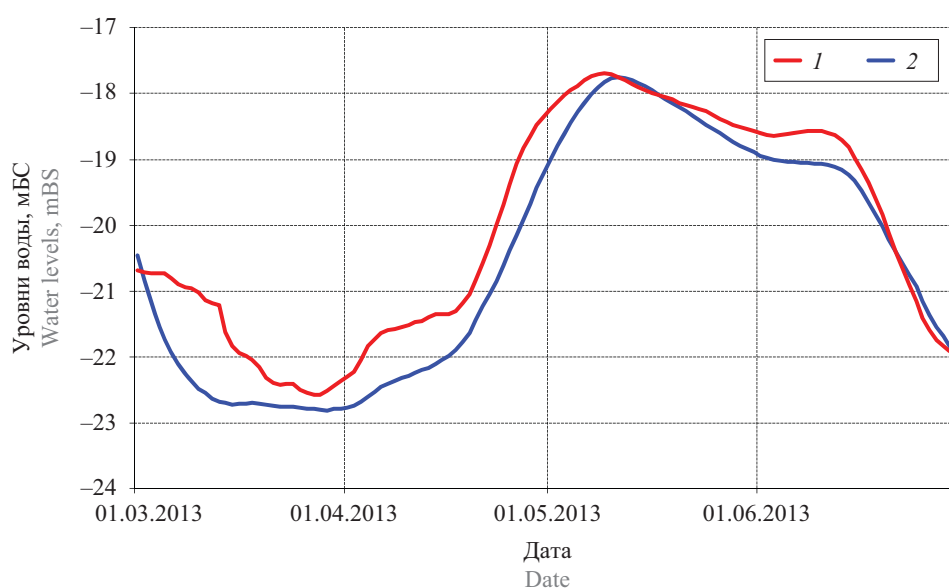


Рис. 1. Уровни воды в р. Волге у с. Енотаевка фактические (1) и рассчитанные в программном комплексе HEC-RAS (2)

Fig. 1. Water levels of Volga River at gauge station Enotaevka: actual (1) and calculated in HEC-RAS (2)

ворительной точностью, то расчетный ход уровней воды на подъеме и особенно на спаде весеннего ппуска заметно отличается от фактического хода уровней воды (рис. 1).

Решить проблему более точного учета происходящих на Нижней Волге гидравлических процессов могли бы двумерные или трехмерные гидродинамические модели, такие как, например, STREAM 2D CUDA [12, 13]. Однако их использование в режиме оперативного управления спецпуском ограничено существенными затратами времени на вычисления. Чтобы выполнить расчет для такого масштабного объекта как Волго-Ахтубинская пойма на современном персональном компьютере потребуется несколько часов, даже при применении технологий параллельных вычислений на графических адаптерах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оперативных расчетов, целью которых является оптимизация гидрографа сбросов из Волгоградского водохранилища, нужна быстродействующая модель. Для создания такой модели начата разработка алгоритма, реализующего фактически двумерную (квазидвумерную) схематизацию моделируемого объекта. В разрабатываемом алгоритме для моделирования движения водных масс будет использоваться сочетание расчетных методов на осно-

ве номограмм динамических объемов для относительно крупных речных участков [14–16] и танковой модели [17, 18] для системы относительно небольших водоемов и соединяющих их водотоков, допускающее схематизацию моделируемого объекта графом произвольной структуры (т.е. с наличием циклов).

Для реализации разрабатываемого алгоритма на первом этапе планируется создание информационных структур, описывающих водные объекты и их участки на основе растровых данных спутникового зондирования Земли SRTM, цифровых карт и космических снимков и позволяющих в автоматизированном режиме масштабировать (детализировать) объект моделирования в зависимости от решаемой задачи.

Протяженность Волго-Ахтубинской поймы от гидроузла Волгоградского водохранилища до с. Верхнее Лебяжье по прямой составляет 350 км. Ширина поймы колеблется от 30–33 км в пределах Волгоградской области до 13–25 км — в пределах Астраханской области (рис. 2). Очевидно, что процесс расчета характеристик многочисленных водных объектов (кривых объемов, площади зеркала, длины, уклона дна и др.), расположенных на ней, требует глубокой автоматизации.

Основой для выделения водных объектов и расчета их характеристик служит цифровая модель рельефа (ЦМР) с плановым разрешением 30 м, полученная по данным радарной съемки SRTM [19].

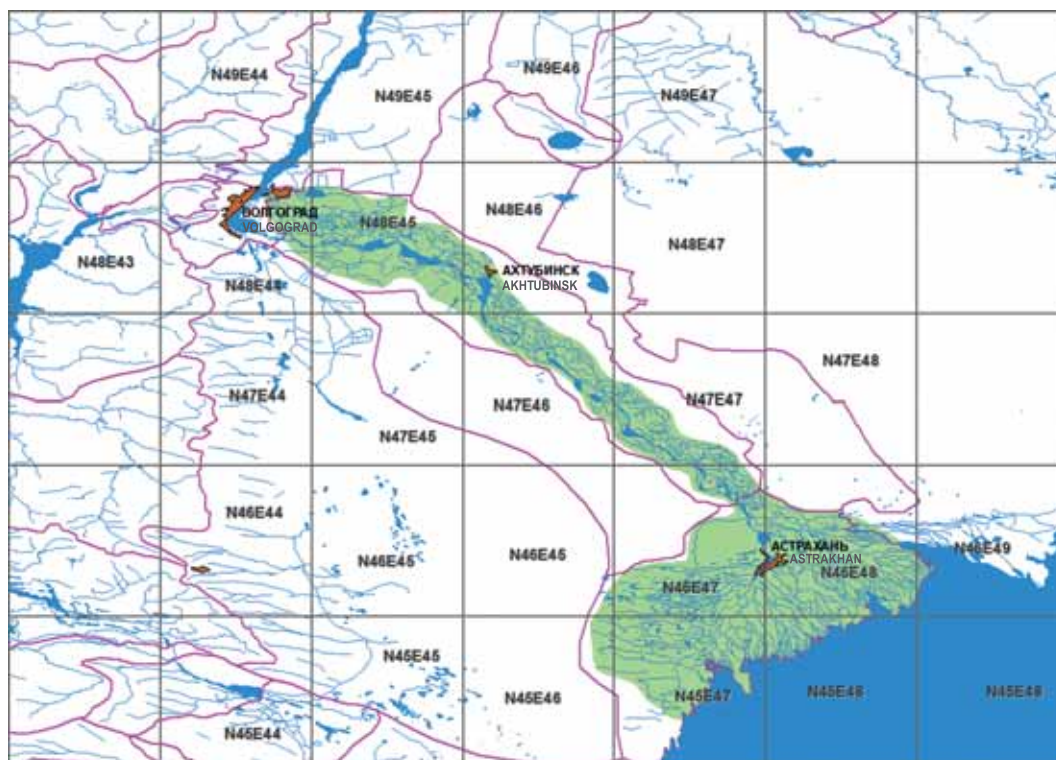


Рис. 2. Схема покрытия Волго-Ахтубинской поймы и соседней территории данными спутникового зондирования Земли SRTM

Fig. 2. SRTM data at Volga-Ahtuba floodplain and neighboring area

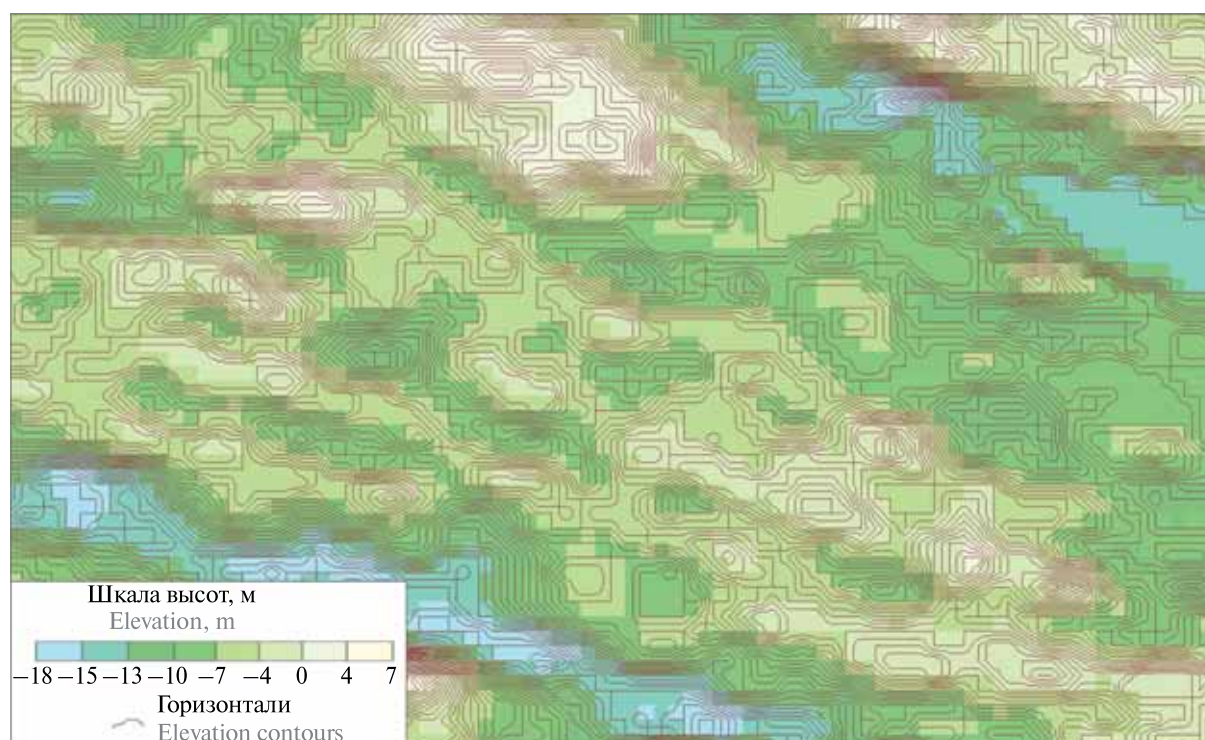


Рис. 3. Фрагмент ЦМР, полученной на основе данных SRTM, с наложенными изолиниями высот

Fig. 3. Original DEM fragment with superimposed elevation contours

Особенностью этой ЦМР является то, что высотные отметки представлены целыми значениями с дискретностью 1 м. Изолинии высот для такого цифрового рельефа имеют неестественную изломанную форму, есть «висячие» изолинии (рис. 3). Идентифицировать водные объекты здесь затруднительно.

Сглаживание ЦМР существующими средствами ГИС [20], как показала практика, не позволяет полностью избавиться от перечисленных недостатков, кроме того, целесообразно обладать собственной процедурой интерполяции, которая может быть интегрирована в будущее программное обеспечение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения более естественной формы цифрового рельефа был разработан алгоритм сглаживания, основанный на экстраполяции отметок исходной ЦМР по шестнадцати точкам по следующей схеме.

Отметка поверхности земли H' в точке с координатами (i, j) рассчитывается по формуле:

$$H'_{ij} = 0,15(2H_{i-1,j} - H_{i-2,j} + 2H_{i+1,j} - H_{i+2,j} + 2H_{i,j-1} - H_{i,j-2} + 2H_{i,j+1} - H_{i,j+2}) + 0,1(2H_{i-1,j-1} - H_{i-2,j-2} + 2H_{i+1,j+1} - H_{i+2,j+2} + 2H_{i-1,j+1} - H_{i-2,j+2} + 2H_{i+1,j-1} - H_{i+2,j-2}), \quad (1)$$

где H — исходные отметки поверхности земли в ячейках сетки, индексы которых соответствуют схеме на рис. 4; 0,15 — взвешивающий коэффициент для ячеек, расположенных крестообразно относительно

экстраполируемой ячейки; 0,1 — взвешивающий коэффициент для диагональных ячеек.

После расчета отметки в точке (i, j) по формуле (1) проверяется, чтобы она не отличалась от исходной отметки больше, чем на $\pm 0,5$ м (рис. 4). Если расчетная отметка выходит за допустимый диапазон, то выполняется корректировка значения по формуле:

$$\begin{aligned} \text{если } H'_{ij} > H_{ij} + 0,5, \text{ то } H'_{ij} &= H_{ij} + 0,5; \\ \text{если } H'_{ij} < H_{ij} - 0,49, \text{ то } H'_{ij} &= H_{ij} - 0,49. \end{aligned} \quad (2)$$

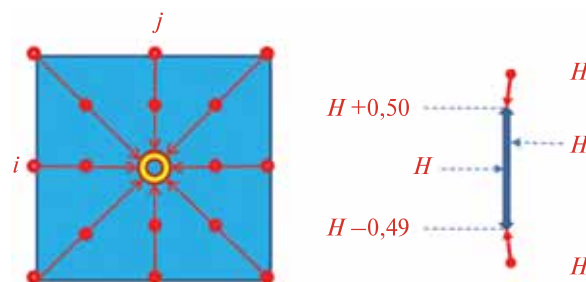


Рис. 4. Схема к формуле сглаживания исходной сетки

Fig. 4. Scheme for the smoothing formula

Представленный алгоритм экстраполяции был реализован в виде программы для ЭВМ на языке FORTRAN и проверен на участке ЦМР, соответствующем 48° с.ш. и 45° в.д. (квадрат N48E45 на рис. 2). Фрагмент сглаженного рельефа приведен на рис. 5,

где видно, что изолинии приобрели более естественные, плавные очертания. Количество «висячих» изолиний существенно сократилось, однако их наличие говорит о необходимости совершенствования описанного алгоритма.

Сглаженная ЦМР является основой для следующего этапа работ — определения границ пойменных емкостей, представляющих собой замкнутые понижения рельефа.

Для этого сначала на ЦМР ищутся локальные минимумы. Локальным минимумом считается точка на ЦМР, вокруг которой отметки поверхности больше или равны, чем отметка в текущей точке, т.е. где $H_{ij} > H_{i+k,j+l}$ для всех значений $k = -1, 1$ и $l = -1, 1$. Если указанное условие выполнено, то точки с координатами $(i+k, j+l)$ из дальнейшего поиска исключаются (рис. 6, а). Поиск осуществляется последовательно по строкам файла с ЦМР.

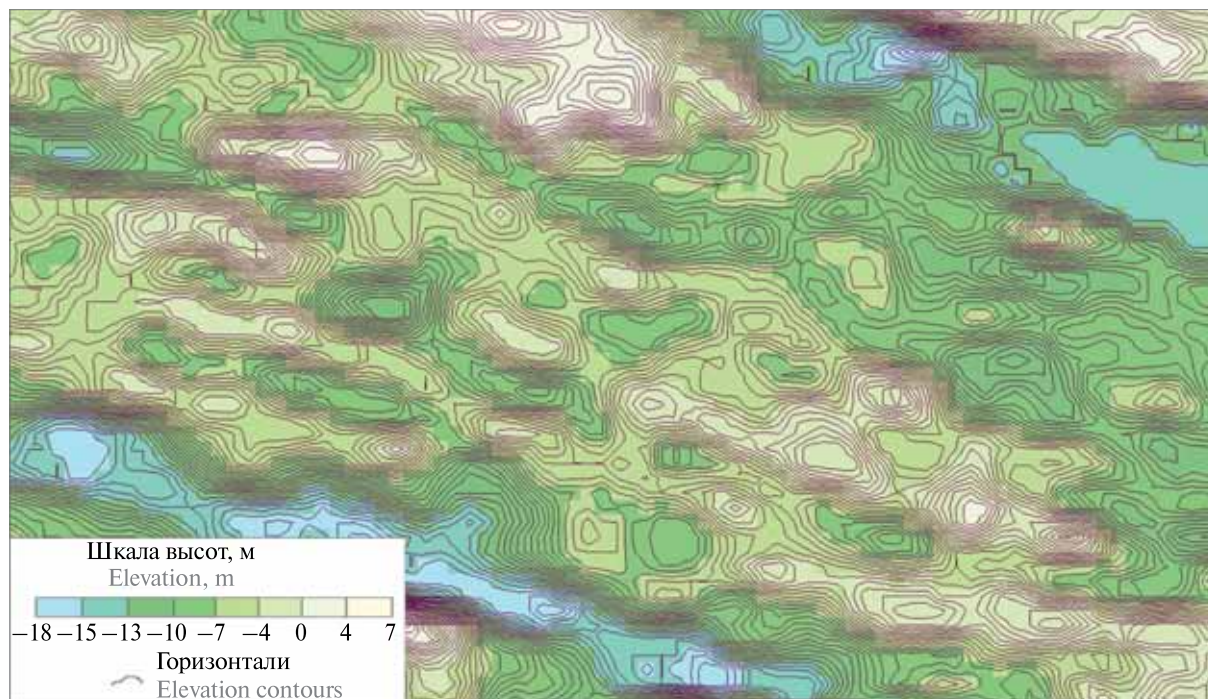


Рис. 5. Фрагмент сглаженной ЦМР с наложенными изолиниями высот

Fig. 5. Smoothed DEM fragment with superimposed elevation contours

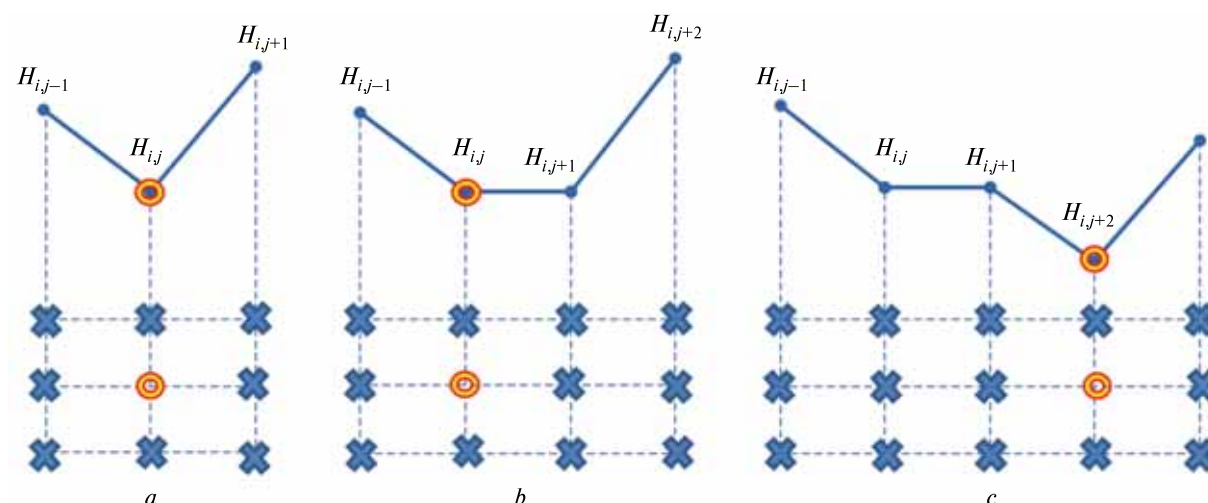


Рис. 6. Схема к определению локальных минимумов на ЦМР: а — локальный минимум в точке с отметкой $H_{ij} > H_{i+k,j+l}$; б — локальный минимум в точке с отметкой $H_{ij} = H_{i+k,j+l}$; в — локальный минимум в точке с отметкой $H_{ij} = H_{i+k,j+l}$ отсутствует

Fig. 6. Scheme for searching local minima on the DEM: а — local minimum is at the point with elevation $H_{ij} > H_{i+k,j+l}$; б — local minimum is at the point with elevation $H_{ij} = H_{i+k,j+l}$; в — no local minimum is at the point with elevation $H_{ij} = H_{i+k,j+l}$

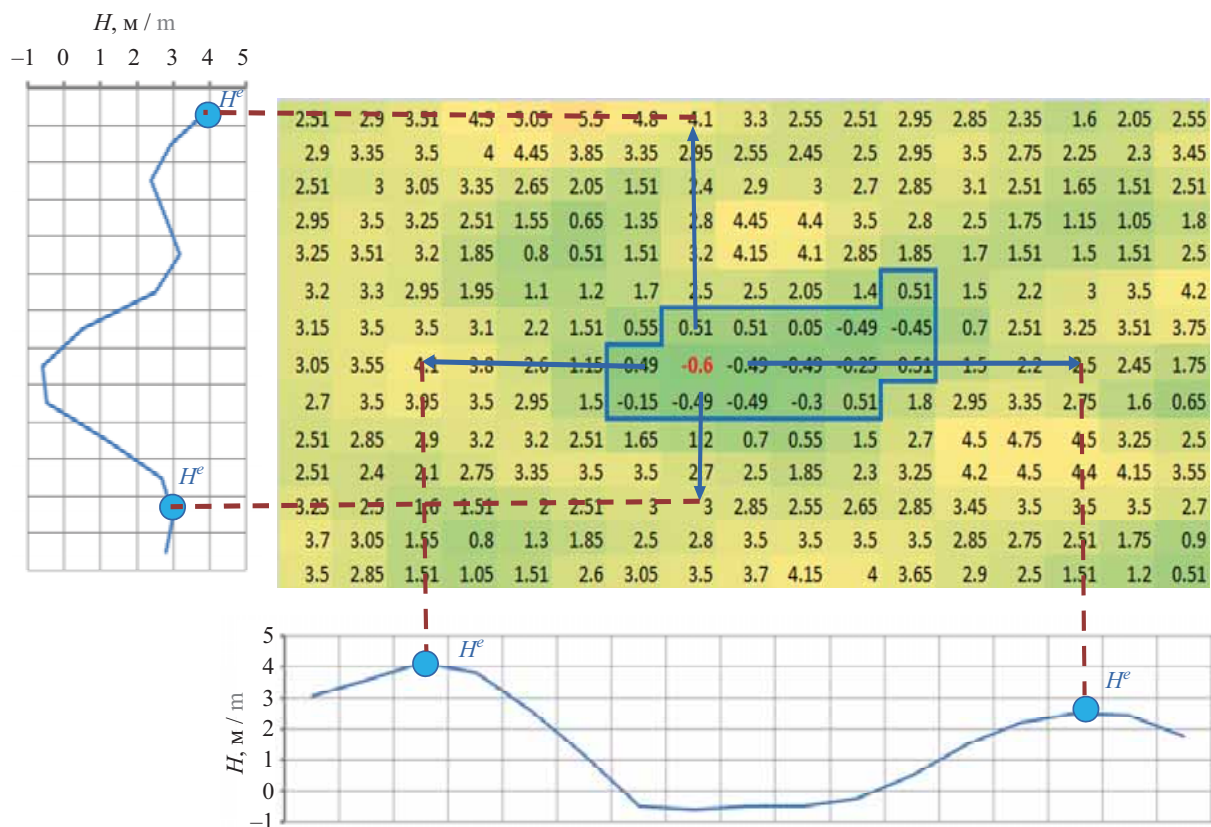


Рис. 7. Схема к определению границ пойменной емкости

Fig. 7. Scheme for determining the boundaries of the floodplain reservoirs

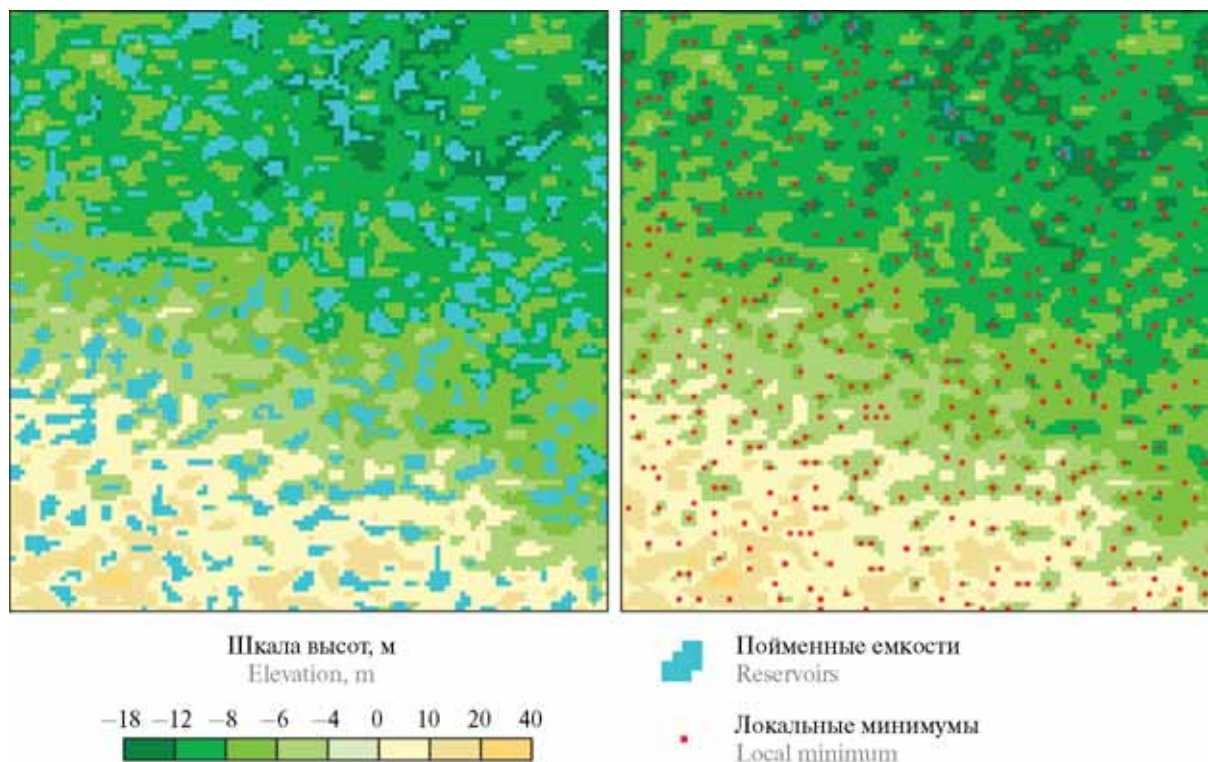


Рис. 8. Положение локальных минимумов и пойменных емкостей на сглаженной ЦМР

Fig. 8. Position of local minima and floodplain reservoirs on the smoothed DEM

Если в точке $(i+k, j+l)$ выполняется условие $H_{ij} = H_{i+k, j+l}$, то производится дополнительная проверка условия локального минимума, при этом точка (i, j) из поиска исключается. Если условие выполнено, то за локальный минимум принимается узел (i, j) (рис. 6, б). Если оказывается, что в какой-либо точке, соседней с $(i+k, j+l)$, отметка поверхности меньше, то минимума в узле (i, j) нет (рис. 6, с).

Полученные локальные минимумы ЦМР являются характерными точками, от которых начинается поиск границ пойменных емкостей. Алгоритм поиска основан на поиске бровок, которые представляют собой локальные максимумы на цифровом рельефе H^e . Сначала бровки ищутся от точки локального минимума $H^{\min}$ по строке, затем — по столбцу (рис. 7). В границах этих бровок определяется положение локальных максимумов для всех столбцов и строк. Из всех значений отметок бровок выбирается минимальная величина и принимается за верхнюю границу уровня воды в пойменной емкости H^b . Далее в границах бровок выполняется поиск узлов, в которых отметка меньше или равна значению H^b . Эти узлы отмечаются на сетке как принадлежащие к данной емкости.

Результаты определения положения локальных минимумов и границ пойменных емкостей с помощью описанных алгоритмов приведены на рис. 8, где

видно, что визуально они хорошо совпадают с понижениями рельефа на сглаженной ЦМР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе разработки математической модели водной системы с развитой сетью пойменных водотоков и водоемов была начата подготовка данных о водных объектах и их участках, расположенных в Волго-Ахтубинской пойме. В связи с ее существенной площадью для подготовки данных используются цифровые ресурсы: цифровые модели рельефа, электронные карты, спутниковые снимки, для обработки которых требуется создание специальных процедур.

В настоящее время разработана, реализована в виде программы для ЭВМ и испытана процедура сглаживания ЦМР, которая предназначена для пересчета целочисленных данных радарной съемки поверхности земли (SRTM), имеющих разрешение по вертикали 1 м, в значения с плавающей точкой. Это позволило получить более плавные и естественные очертания цифрового рельефа.

Результаты работы алгоритмов поиска локальных минимумов на ЦМР и определения положения и границ пойменных емкостей позволяют перейти к следующим этапам работы: расчету характеристик водных объектов, построению графа модели, разработке системы хранения данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 22–35.
2. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Reduction in the numbers of blood-sucking blackflies in Volgograd during the 2018 World Cup as special task of complex water resource management of the cascade reservoir system // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 9. Issue 4. Pp. 292–298. DOI: 10.1134/S2079096119040012
3. Simonovic S.P. Managing water resources: Methods and tools for a systems approach. UNESCO Publishing, London, Sterling, VA, 2009.
4. Simonovic S.P. Water resources management — towards performance based approach // Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2021. Issue 2, 2021. Pp. 84–93. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-6
5. Loucks P., van Beek E., Stedinger J., Dijkman J.P.M., Villars M.T. Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications. UNESCO Publishing, Paris, 2005.
6. Loucks D.P. Public systems modeling // International Series in Operations Research & Management Science. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-93986-1
7. Кучмент Л.С. Линейные модели расчета неустановившегося движения воды в реках // Труды ЦИП. 1965. № 141. С. 21–34.
8. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л. : Гидрометеиздат, 1972. 191 с.
9. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М. : ИВП РАН, 2018. 300 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001
10. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю. Компьютерное моделирование изменений уровня воды на Нижней Волге // Природообустройство. 2009. № 4. С. 68–72.
11. Бубер А.А., Бородычев В.В., Талызов А.А. Разработка гидродинамической модели дельты реки Волги и Западных подступных ильменей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2 (46). С. 271–283.
12. Belikov V.V., Borisova N.M., Glotko A.V. Numerical Hydrodynamic 2D-Simulation of the Inundation of Tulun Town on the Iya R. during Flood 2019 //

Water Resources. 2021. Vol. 48. Issue 5. Pp. 713–725. DOI: 10.1134/S0097807821040023

13. Alekseyuk A.I., Belikov V.V. Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2017. Vol. 57. Issue 2. Pp. 318–339. DOI: 10.1134/S0965542517020026

14. Беднарук С.Е., Чуканов В.В., Дильман Н.А., Кленов Е.М. Использование номограмм динамических объемов в имитационной модели Волжско-Камского каскада водохранилищ // *Природообустройство*. 2017. № 1. С. 24–29.

15. Дильман Н.А., Матрюкова А.В., Беднарук С.Е., Чуканов В.В. Построение номограмм динамического объема с использованием гидродинамического моделирования на примере Угличского водохранилища // *Природообустройство*. 2015. № 2. С. 69–73.

16. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Kozlov D.V., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. The experience in applying a water reservoir operation model using dynamic volume

nomograms in exercising special-purpose spring water releases // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. Issue S1. Pp. 29–38. DOI: 10.1134/S0097807818050299

17. Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вербей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.

18. Raudkivi A.J. *Hydrology: an Advanced Introduction to Hydrological Process and Modelling*. Oxford, Pergamon Press, 1979. 479 p.

19. Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006. Vol. 57. Issue 4. Pp. 241–262. DOI: 10.1016/s0924-2716(02)00124-7

20. Землянов И.В., Горелиц О.В., Павловский А.Е., Шкунова Е.Ю. Использование геоинформационных технологий для оценки современных морфометрических характеристик водных объектов // *Труды Государственного океанографического института*. 2009. № 212. С. 260–271.

Поступила в редакцию 13 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 15 сентября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Сергей Евстафьевич Беднарук — начальник Информационно-аналитического центра регистра и кадастра; Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; sebed@vodinfo.ru;

Алина Валерьевна Матрюкова — старший инженер, лаборатория Научно-инженерный центр; Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН); 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; alina_crk@bk.ru;

Виталий Викторович Чуканов — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория Научно-инженерный центр; Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН); 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; 4yk@vodinfo.ru.

Вклад авторов:

Беднарук С.Е. — научное руководство, разработка алгоритма, научное редактирование текста статьи, итоговые результаты и выводы.

Матрюкова А.В. — подготовка исходных данных, обработка результатов расчетов, доработка текста статьи.

Чуканов В.В. — разработка программного кода, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Information support technology for water reservoirs cascades management. *Hydraulic Engineering*. 2017; 7:22-35. (rus.).

2. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Reduction in the Numbers of Blood-Sucking Blackflies in Volgograd during the 2018 World Cup as Special Task of Complex Water Resource Management of the Cascade Reservoir System. *Arid Ecosystems*. 2019; 9(4):292-298. DOI: 10.1134/S2079096119040012

3. Simonovic S.P. *Managing water resources: Methods and tools for a systems approach*. UNESCO Publishing, London, Sterling, VA, 2009.

4. Simonovic S.P. Water resources management — towards performance based approach. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2021; 2,2021:84-93. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-6

5. Loucks P., van Beek E., Stedinger J., Dijkman J.P.M., Villars M.T. *Water resources systems planning and management: An introduction to methods,*

models and applications. UNESCO Publishing, Paris, 2005.

6. Loucks D.P. Public systems modeling. *International Series in Operations Research & Management Science*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-93986-1

7. Kuchment L.S. Linear models for river unsteady flow calculations. *Works of CIP*. 1965; 141:21-34. (rus.).

8. Kuchment L.S. *Mathematical modeling of river flow*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972; 191. (rus.).

9. Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Models of runoff formation in problems of hydrology of river basins*. Moscow, IWP RAS, 2018; 300. DOI: 10.31857/S9785907036222000001 (rus.).

10. Bolgov M.V., Krasnozhen G.F., Shatalova K.Yu. Computer simulation of water level changes on the nizhniaya (lower) Volga. *Environmental Management*. 2009; 4:68-72. (rus.).

11. Buber A.A., Borodichev V.V., Talyzov A.A. Development of a hydrodynamic model of the Volga river delta and Western substeppe ilmens. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2017; 2(46):271-283. (rus.).

12. Belikov V.V., Borisova N.M., Glotko A.V. Numerical hydrodynamic 2D-simulation of the inundation of Tulun town on the Iya R. during Flood 2019. *Water Resources*. 2021; 48(5):713-725. DOI: 10.1134/S0097807821040023

13. Aleksyuk A.I., Belikov V.V. Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2017; 57(2):318-339. DOI: 10.1134/S0965542517020026

14. Bednaruk S.E., Chukanov V.V., Dilman N.A., Klenov E.M. Using nomograms of dynamic volumes in the simulation model of the Volga-Kama cascade of reservoirs. *Environmental Management*. 2017; 1:24-29. (rus.).

15. Dilman N.A., Mastuyukova A.V., Bednaruk S.E., Chukanov V.V. Dynamic volume nomograms development using hydrodynamic modeling on the example of the Uglich reservoir. *Environmental Management*. 2015; 2:69-73. (rus.).

16. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Kozlov D.V., Mastuyukova A.V., Chukanov V.V. The experience in applying a water reservoir operation model using dynamic volume nomograms in exercising special-purpose spring water releases. *Water Resources*. 2018; 45(S1): 29-38. DOI: 10.1134/S0097807818050299

17. Cunge G.A., Holly F.M., Verwey A. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Moscow, Energoatomizdat, 1985; 255. (rus.).

18. Raudkivi A.J. *Hydrology: an Advanced Introduction to Hydrological Process and Modelling*. Oxford, Pergamon Press, 1979; 479.

19. Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by space-borne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006; 57(4):241-262. DOI: 10.1016/s0924-2716(02)00124-7

20. Zemlianov I.V., Gorelits O.V., Pavlovsky A.E., Shikunova E.U. The use of geoinformation technology for the estimation of modern morphometric characteristics of water objects. *Works of State oceanographic institute*. 2009; 212:260-271. (rus.).

Received September 13, 2022.

Adopted in revised form on September 15, 2022.

Approved for publication on September 15, 2022.

BIONOTES: **Sergey E. Bednaruk** — Head of the Information and Analytical Center of the Register and Cadastre; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev)**; 49 Timirazevskaya st., Moscow; 127550, Russian Federation; sebed@vodinfo.ru;

Alina V. Mastuyukova — Senior Engineer, Laboratory Research and Engineering Center; **Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS)**; 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation; alina_crk@bk.ru;

Vitaliy V. Chukanov — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory Scientific and Engineering Center; **Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS)**; 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation; 4yk@vodinfo.ru.

Contribution of the authors:

Sergey E. Bednaruk — scientific supervision, scientific editing of the article text, final results and conclusions.

Alina V. Mastuyukova — preparing initial data, results proceeding, article text editing.

Vitaliy V. Chukanov — code development, original text writing.

The authors declare that there is no conflict of interests.

Сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки

Павел Анатольевич Журавлев, Сергей Борисович Сборщиков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Принципы и направления развития территорий как свободных, так и уже застроенных являются ключевыми факторами в формировании комфортного городского пространства. Инструментом для реализации модернизации и трансформации выступают соответствующие качественные и сбалансированные проектные решения, принятие которых в условиях многофакторности должно наиболее полно отвечать целям реинжиниринга и характеризоваться минимумом затрат и максимальной эффективностью.

Материалы и методы. Предмет исследования — проектные решения в отношении территорий и застройки, учитывающие особенности существующих градостроительных решений. Выбор вариантов развития территорий и застройки, управление и организация мероприятиями реинжиниринга осуществляются на основе параметрического моделирования и математического обеспечения. Алгоритм создания параметрической модели предполагает регламентацию элементов и их параметров с учетом особенностей существующих градостроительных решений (территорий и застройки). Представлены классификация и описание параметров реинжиниринга территорий и застройки по его элементам, включающим: застройку, как совокупность объектов капитального строительства (ОКС), земельный участок, благоустройство территории (в том числе озеленение), а также инженерную защиту. Метод исследования — структурный и функциональный анализ.

Результаты. Приведены (систематизированы) параметры сводной параметрической модели организации реинжиниринга территорий и застройки по функциональному признаку (с возможностью дальнейшей декомпозиции), учитывающие особенности элементов градостроительных решений. Сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки учитывает интеграцию группировки укрупненных показателей. Значимость сводной параметрической модели для создания комфортной и безопасной среды жизнедеятельности выражается принятием практических решений по реализации мероприятий эксплуатации или реинжиниринга территорий и застройки.

Выводы. Предложенные критерии количественной оценки и уровня важности параметров реинжиниринга территорий и застройки, сформированные с применением математического метода структурной аналитической оценки (экспертизы), позволяют осуществлять управление сценариями развития проектных решений, содержащихся в мероприятиях реинжиниринга, как наиболее полно отражающих соответствие мероприятий реинжиниринга его целям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реинжиниринг градостроительного решения, реинжиниринг территорий и застройки, параметры реинжиниринга территорий, математический метод структурной аналитической оценки, параметрическая модель, состав параметрической модели, реинжиниринг в строительстве

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Журавлев П.А., Сборщиков С.Б. Сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1240–1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1240-1249

Автор, ответственный за переписку: Сергей Борисович Сборщиков, sbs@mgso.ru.

A consolidated parametric model designated for the arrangement of reengineering of territories and built-up areas

Pavel A. Zhuravlev, Sergej B. Sborshchikov

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

ABSTRACT

Introduction. The need for the development and transformation of urban areas is determined by the growing demand for a high-quality urban environment among the population. The principles and focuses of development of unoccupied and built-up areas are the essential key factors for the formation of a comfortable urban space. The tool for implementing such updates, upgrades and transformations represents a set of appropriate high-quality and well-balanced design solutions, which, if implemented, must most comprehensively suit the purpose of reengineering and be characterized by minimal

costs and maximal efficiency in conditions of multifactority. The article addresses the application of parametric modeling to the relevant problem of management and arrangement of reengineering of territories and built-up areas.

Materials and methods. The subject of the study encompasses design solutions developed for territories and built-up areas. They are to take into account the features of current urban planning. Parametric modeling and mathematical support facilitate the choice of development options for territories and built-up areas, the management and arrangement of reengineering activities. The algorithm for developing a parametric model entails the regulation of elements and their parameters, taking into account the features of current urban planning solutions (territories and built-up areas). The study presents a classification and description of parameters for the reengineering of territories and built-up areas broken down by the elements, including a built-up area as a set of capital construction projects, a land site, landscaping (including greening), as well as engineering protection. The research method includes structural and functional analysis.

Results. Parameters of the consolidated parametric model designed for the arrangement of reengineering of territories and built-up areas are presented (systematized) according to their functions (with an option for their further decomposition), taking into account features of elements of urban planning solutions. It is noteworthy that the consolidated parametric model, developed for the arrangement of the reengineering of territories and built-up areas, takes into account the consolidation of a group of aggregate indicators. The significance of this consolidated parametric model for creating a comfortable and safe living environment is expressed in practical solutions on the implementation of actions consisting in the operation or reengineering of territories and built-up areas based on the data from the information management system, that includes the arrangement of monitoring and collection of information about the condition of territories and built-up areas.

Conclusions. The proposed criteria for the qualitative evaluation and identification of the level of importance of reengineering parameters, applied to territories and built-up areas, developed using the mathematical method of structural analytical evaluation (examination), allow for the management of project solution scenarios, implemented in reengineering events, since they convey the compliance between reengineering events and their purpose in the most comprehensive way.

KEYWORDS: reengineering of urban planning solutions, reengineering of territories and built-up areas, reengineering parameters of territories, mathematical method of structural analytical evaluation, parametric model, composition of a parametric model, reengineering in construction

FOR CITATION: Zhuravlev P.A., Sborshchikov S.B. A consolidated parametric model designated for the arrangement of reengineering of territories and built-up areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1240-1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1240-1249 (rus.).

Corresponding author: Sergej B. Sborshchikov, sbs@mgssu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость развития и преобразования городских территорий определяется возрастающими потребностями населения в качестве городской среды [1–6]. Объектом исследования идентифицируется процесс реинжиниринга (включающий развитие, обновление, модернизацию, переоснащение и трансформацию) территорий как свободных, так и уже застроенных, который является ключевым фактором в формировании комфортного городского пространства. Оптимизационные мероприятия реинжиниринга рассматриваются как инструмент управления развитием территорий и застройки и обеспечиваются (обосновываются) проектным подходом.

Предмет исследования — проектные решения в отношении территорий и застройки, учитывающие особенности существующих градостроительных решений.

Проблематика выбора перспективных направлений развития (обновления, модернизации, переоснащения и трансформации) территорий и застройки выражается сложностью и многогранностью организации проектирования. Разработка и сравнение вариантов проектных решений позволяет при многокритериальном воздействии учитывать различные условия функционирования (преобразования, трансформации) территорий и застройки, что является методологической основой градостроительного проектирования.

Развитие территорий и застройки предусматривает управленческие процедуры, включающие ин-

струменты (научные подходы), связанные с моделированием развития территорий и застройки.

Управление и моделирование вариантов проектных решений в составе мероприятий реинжиниринга территорий и застройки осуществляется параметрическим подходом, с обеспечением на основе математического аппарата.

С целью оценки уровня управления и получения оптимального результата от мероприятий реинжиниринга территорий и застройки выполняется структурно-параметрическое моделирование системы, которое обеспечивает построение иерархической архитектуры (структуры), проведение ее анализа на предмет оптимальности связей, выявление уровней подчиненности, определение количественной меры в выявленной иерархической подчиненности.

Последовательность построения иерархии осуществляется аналитической экспертизой (экспертной оценкой) с применением инструментариев математического аппарата, в том числе: парных и множественных сравнений, матричных и графовых методов структурной оценки.

Методология парных сравнений и направленного графа используется как наиболее отражающая возможность в данной сфере [7–9].

В основе параметрического моделирования мероприятий реинжиниринга территорий и застройки лежит проектирование с помощью параметрических данных, которые характеризуются масштабностью и сложной системой связей внутри основных элементов градостроительных решений территорий и застройки [10–12].

Таким образом, в условиях многокритериального выбора актуальной задачей является определение оптимального состава мероприятий реинжиниринга территорий и застройки для формирования комфортного городского пространства.

Цель исследования — применение параметрического подхода и создание сводной параметрической модели для управления мероприятиями по организации реинжиниринга территорий и застройки.

Задачи исследования — учитывая характеристики и особенности существующих параметров элементов градостроительных решений, выработать критерии обоснования (оценки эффективности) мероприятий реинжиниринга территорий и застройки, отражающие его цель.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрение в исследовании территории и расположенной на ней застройки, как единого целого объекта воздействий, указывает на актуальность постановки задачи в данном изложении и необходимость установления как ее составляющей — формирование сводной параметрической модели реинжиниринга, принимающей во внимание особенности организации преобразований существующих градостроительных решений (решений территорий и застройки) [13, 14]. Принимая во внимание указанный подход, следует выполнить классификацию параметров, агрегировав их по определенным основным элементам градостроительного решения (рис. 1) [15, 16]:

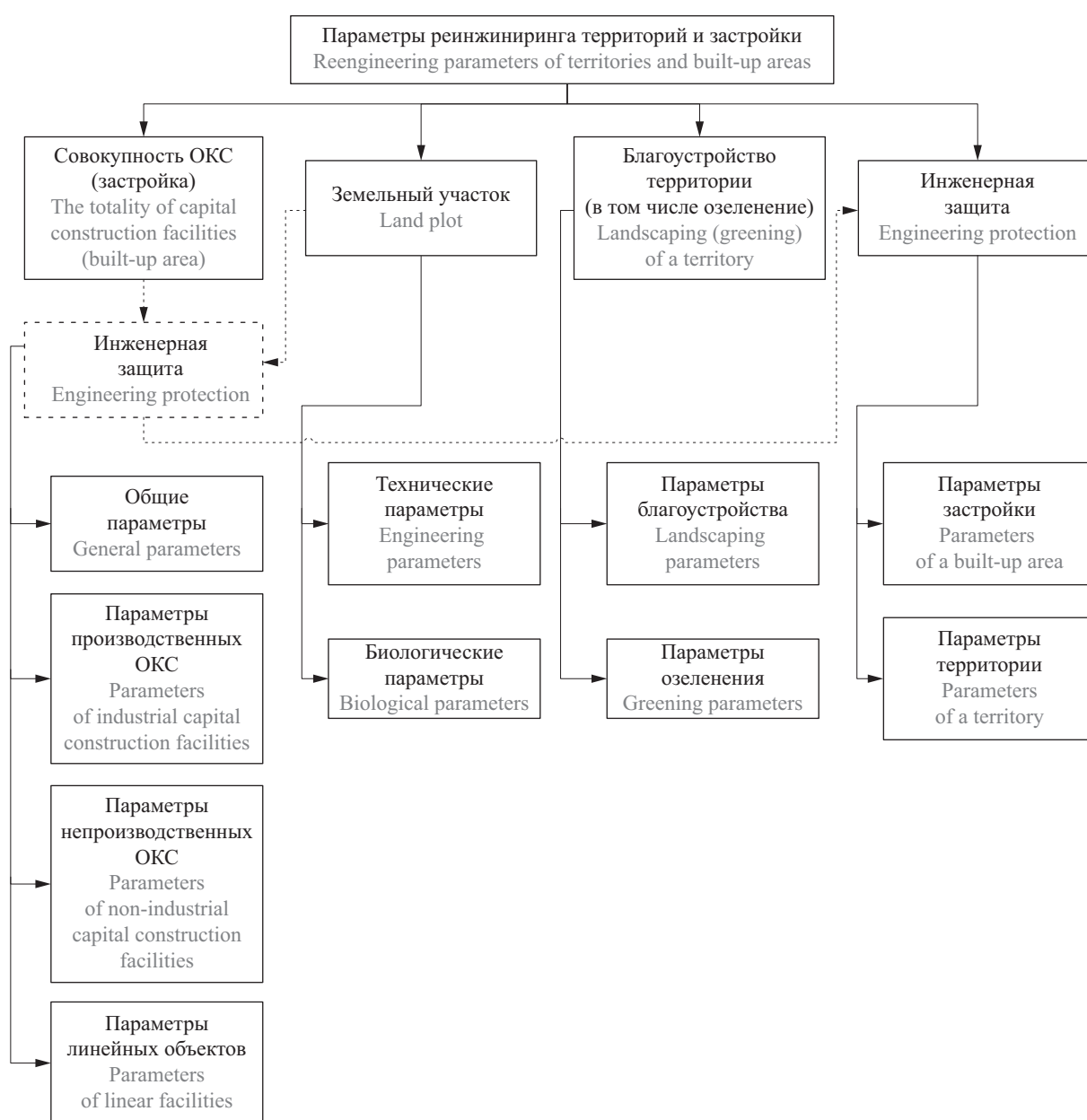


Рис. 1. Классификация параметров реинжиниринга территорий и застройки по его элементам

Fig. 1. Classification of parameters of reengineering of territories and built-up areas by elements

- застройка, как совокупность объектов капитального строительства (ОКС);
- земельный участок;
- благоустройство территории, в том числе озеленение;
- инженерная защита.

В данной классификации инженерная защита определена как отдельная группа, хотя по всем признакам она является ОКС. Однако необходимо указать, что сооружения инженерной защиты могут функционально относиться как к отдельному ОКС, так и ко всей территории, предохраняя от влияния неблагоприятных природных и эксплуатационных воздействий, имеющих различную природу возникновения [17]. В этой связи параметры инженерной защиты представляется целесообразным разделить соответственно на две составляющие:

- параметры застройки;
- параметры территорий.

Таким образом, первая составляющая характеризует объемно-планировочные и конструктивные решения инженерной защиты отдельных ОКС, а вторая составляющая — решения инженерной защиты земельного участка, группы зданий или линейного сооружения, и расположенная в его полосе отвода.

Как отмечалось выше, застройка — это совокупность ОКС, объединенных единым градостроительным замыслом или решением. Поэтому представляется оправданным параметры застройки группировать следующим образом:

- общие параметры застройки;
- параметры производственных ОКС;
- параметры непроизводственных ОКС;
- параметры линейных объектов.

Как видно, основу данной классификации параметров составляют положения Постановления Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (ред. от 01.12.2021), что обеспечивает единый подход к параметрическому моделированию реинжиниринга и его соответствие действующей нормативной базе инвестиционно-строительной деятельности.

Земельный участок, как часть земной поверхности с фиксированными границами и связанный с природными процессами, характеризуется:

- техническими параметрами;
- биологическими параметрами.

Технические параметры являются обоснованием таких трансформаций, как изменение планировочных решений, габаритов и т.п., а биологические параметры составляют основу для принятия и реализации агротехнических мероприятий (в основном при рекультивации), например, таких как восстановление плодородного слоя почвы, компенсирующие посадки растительности и т.д.

С земельным участком неразрывно связаны, но выделены в отдельную группу классификации, благоустройство и озеленение, которые описываются собственными множествами параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Указанные элементы градостроительного решения определяют мероприятия реинжиниринга территорий и застройки, которые располагают своими отличительными особенностями и сферой применения. В этой связи по функциональному признаку



Рис. 2. Классификация параметров реинжиниринга территории и застройки по функциональному признаку
Fig. 2. Classification of reengineering parameters of a territory and a built-up area by their functions

параметры реинжиниринга, как и в предыдущей классификации, можно разделить на территории и застройки (рис. 2), и допускающие дальнейшую декомпозицию.

Итак, составляющая модели, которая описывает территорию, должна включать параметры [18–23]:

- реновации;
- рекультивации.

А составляющая, характеризующая застройку [24–27], будет, вероятно, содержать параметры, указывающие на:

- техническое перевооружение;
- реконструкцию;
- реновацию;
- новое строительство.

Стоит отметить, что параметры первой и второй классификации допускают:

- 1) количественное и качественное представление;
- 2) наличие нормативных, проектных и фактических значений.

Значения параметров могут иметь числовое (формальное) или смысловое (неформальное) выражение, а также идентифицироваться на определенном этапе жизненного цикла ОКС.

Учитывая все вышеприведенное, можно утверждать, что сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки будет интегрировать группировки укрупненных показателей. Принятие управленческих решений о необходимости того или иного мероприятия в программе реинжиниринга и возможности (подготовленности) его реализации должны быть обоснованы. Ввиду того, что различные параметры имеют неодинаковое влияние на данные решения, следует закрепить это положение при помощи использования коэффициентов значимости (важности) (табл.).

В данном примере значимость мероприятий и укрупненных параметров обозначена достаточно условно (приблизительно). Конкретизация таких коэффициентов должна производиться в каждом отдельном случае. В дальнейшем предполагается разработать формализованное представление назначения указанных коэффициентов значимости. Необходимо указать, что кроме отличия значимости также присутствует вариативность самих значений показателей при различных сценариях инвестиционной программы реинжиниринга территорий и застройки. Поэтому

му требуется выбрать тот вариант развития событий, который наиболее полно соответствует цели реинжиниринга и характеризуется при этом минимумом затрат и максимумом эффекта. Решение этой задачи может быть достигнуто методом парных сравнений различных вариантов инвестиционной программы реинжиниринга [28, 29].

Использование данного метода допускает:

1) экспресс-оценку по мероприятиям программы реинжиниринга с установлением целесообразности их реализации и на этой основе их сочетания в инвестиционной программе;

2) детальную оценку вариантов по укрупненным параметрам, что позволяет сформировать оптимальный вариант программы реинжиниринга и установить не только сочетание мероприятий, но и его характер, и объемы конкретных видов работ;

3) сравнение нормативных, проектных и фактических параметров для определения необходимости реинжиниринга в целом и его мероприятий в отдельности.

Используя совместно с теорией парных сравнений методологию направленного графа, установим $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ множество вариантов с единым набором (номенклатурой), который описывается совокупностью $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$.

Как указано выше, параметры рассматриваемых вариантов имеют неодинаковый уровень важности или вес, другими словами, с различной степенью способствуют достижению цели инвестиционной программы реинжиниринга. В свою очередь, каждый вариант обладает некой интенсивностью отображения в нем какого-либо параметра.

Решением задачи является установление того варианта, который с максимальным эффектом достигает цели инвестиционной программы. В этой связи можно выделить два этапа в ее решении.

Первый этап — структуризация номенклатуры, т.е. интерпретация ее в формате иерархии, как частично упорядоченных множеств.

Второй этап предполагает:

- идентификацию интенсивности проявления параметров у каждого варианта — веса конкретного параметра;
- установление уровня важности (веса) самих параметров в контексте цели инвестиционной программы реинжиниринга.

Классификация мероприятий и укрупненных параметров реинжиниринга территорий и застройки

Classification of actions and consolidated parameters of reengineering of territories and built-up areas

Код Code	Наименование мероприятия реинжиниринга Reengineering action	Значимость мероприятия реинжиниринга Significance of a reengineering action	Наименование укрупненного показателя Consolidated indicator	Значимость укрупненного показателя Significance of a consolidated indicator

Для определения весов необходимо выполнить:

- парные сравнения вариантов на основе интенсивности проявления в них каждого параметра;
- парные сравнения параметров относительно их важности для цели инвестиционной программы реинжиниринга. Для этого требуется определенная количественная шкала от 1 до 9, в которой можно выразить сравнения пар как вариантов, так и параметров. Количественно парные сравнения задаются в этой шкале и представляются матрицей размера $n \times n$:

$$A = (a_{ij}), (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

Элементы a_{ij} определяются следующим образом:

- 1) если $a_{ij} = \alpha$, то $a_{ji} = 1/\alpha$, при условии $\alpha \neq 0$, $\alpha \in \{1, 2, \dots, 9\}$;
- 2) если оценки таковы, что в варианте V_i интенсивность проявления параметра такая же, как и у претендента V_j , то $a_{ij} = a_{ji} = 1$, в частности $a_i = 1$ для всех i .

После представления количественных оценок интенсивности проявления параметров во всех парах (V_i, V_j) через a_{ij} необходимо каждому варианту V_i поставить вес w_i относительно этого параметра. Следует определить собственный вектор матрицы парных сравнений, соответствующий максимальному значению:

$$AW = \lambda_{\max} W, W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T, \quad (2)$$

где T — символ транспонирования.

Для нормализованного решения полагаем $\alpha = w_1 + \dots + w_n$ и заменяем вектор W на вектор $(1/\alpha)W$ (в дальнейшем полученный вектор будем обозначать W , что обеспечивает единственность вектора весов W , а также то, что $\alpha = w_1 + \dots + w_n$).

Аналогично рассчитываются веса параметров относительно цели инвестиционной программы реинжиниринга путем матрицы их парных сравнений, на основе которой устанавливается максимальный собственный вектор, соответствующий наибольшему значению, и проводится его нормализация.

Заключительный этап — определение варианта, который максимально способствует достижению цели инвестиционной программы реинжиниринга. Для этого идентифицируются веса вариантов относительно цели, и выбирается тот сценарий, который имеет наибольший вес. Формализованная запись данной процедуры:

$$W = [W_1 W_2 \dots W_m] W_V, \quad (3)$$

где $W_i = (w_1^i, w_2^i, \dots, w_n^i)^T$ — вектор весов вариантов относительно i -го параметра; n — количество вариантов, $i = 1, 2, \dots, m$; m — количество параметров; $W_V = (w_1^V, w_2^V, \dots, w_m^V)^T$ — вектор весов параметров в преломлении цели инвестиционной программы реинжиниринга.

Объединение методологии парных сравнений и направленного графа позволяет на этой основе сформировать адекватную параметрическую модель реинжиниринга территорий и застройки, которая, как уже отмечалось, в дальнейшем должна стать генези-



Рис. 3. Практическая значимость параметрической модели реинжиниринга территории и застройки

Fig. 3. Practical significance of the parametric model of reengineering of a territory and a built-up area

сом принятия решений о необходимости, характере и объеме тех или иных преобразований (рис. 3).

Большое значение приобретает процедура формирования исходных данных для организации эффективной эксплуатации совокупности ОКС, земельных участков и их реинжиниринга как единого целого для создания комфортной и безопасной среды жизнедеятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные критерии количественной оценки и уровня важности параметров реинжиниринга территорий и застройки, сформированные с применением математического метода структурной аналитической оценки (экспертизы), позволяют осуществлять управление сценариями развития проектных

решений, содержащихся в мероприятиях реинжиниринга, как наиболее полно отражающих соответствие мероприятий реинжиниринга его целям.

Наполнение параметрической модели реинжиниринга территорий и застройки фактическими значениями предполагает осуществление мониторинга за их техническим состоянием, который может выполняться как на постоянной основе, так и с определенной периодичностью. В том и другом случае это достаточно большой объем информации, которая подлежит обработке, хранению и передаче для принятия решения. Таким образом, можно утверждать, что необходима информационная система управления территорией и застройкой, которая впоследствии может быть интегрирована в информационную систему населенного пункта (smart city).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батоева Э.В. Определение наиболее эффективных инноваций в сфере жилищного строительства // *Baikal Research Journal*. 2017. Т. 8. № 4. С. 25. DOI: 10.17150/2411-6262.2017.8(4).25
2. Колмакова Е.М., Колмакова И.Д., Дегтярева Н.А. Пространственное развитие региона в контексте стратегии социально-экономического роста // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2018. № 3 (413). С. 30–37.
3. Кажуро Н.Я. Концепция устойчивого развития как новая парадигма общественного прогресса // *Наука и техника*. 2016. Т. 15. № 6. С. 511–520. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-6-511-520
4. Graboviy P. Reconstruction and modernization of industrial parks // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. Issue 147. P. 08028. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199108028
5. Dontsov D.G., Yushkova N.G. Principles of sustainable development of the territory and priorities of architectural and urban construction activity // *AIP Conference Proceedings*. 2017. P. 050011. DOI: 10.1063/1.4973071
6. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management // *Civil Engineering Journal*. 2016. Vol. 2. Issue 6. P. 262. DOI: 10.28991/cej-030986
7. Покровский А.М., Шуметов В.Г. Экспертно-аналитические прогнозные модели в стратегическом менеджменте: методологические подходы и методический инструментарий // *Вестник евразийской науки*. 2015. Т. 7. № 2(27). С. 57. DOI: 10.15862/87EVN215
8. Милых Ф.Г., Сбоев Б.К. Экспертно-аналитические технологии оценки инновационных проектов: компаративный анализ // *Управление экономическими системами*. 2012. № 12 (48). С. 120.
9. Атаев А.М. Требования к моделям оценки инновационных проектов на различных этапах их обоснования // *Транспортное дело России*. 2012. № 3. С. 15–18.
10. Грязнова Н.В., Сайтибрагимов А.Э. Цифровая параметрическая градостроительная документация // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2 (37). С. 330–341. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-330-341
11. Федчун Д.О., Тлустый Р.Е. Сравнительный анализ методов параметрического, информационного и генеративного архитектурного проектирования // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 1 (34). С. 103–115. DOI: 10.5281/zenodo.1196721
12. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm // *Construction Management and Economics*. 2015. Vol. 33. Issue 5–6. Pp. 453–466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982
13. Лихобабин К.А., Шевнина А.П., Поморов С.Б. Параметрическая методология в работе архитектора // *Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова*. 2015. № 1–2. С. 223–226.
14. Гоголкина О.В. Особенности формирования конструкций в параметрической архитектуре // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. № 1 (42). С. 355–363.
15. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Структура и состав реинжиниринга застройки // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 11. С. 1508–1519. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1508-1519
16. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Структура и состав реинжиниринга территорий, его организационные схемы и ресурсообеспечение // *Строитель-*

ство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.2

17. Журавлев П.А., Сборщиков С.Б. Организационные особенности формирования технических решений инженерной защиты территории на этапах жизненного цикла и их реинжиниринг (часть 2) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. № 1 (33). С. 77–91. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-77-91

18. Ибе Е.Е., Абдываитова Д.Д., Шибеева Г.Н. Реновация территории бывшего гидролизного завода в Республике Хакасия под жилую застройку // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3. С. 6.

19. Долотказина Н.С., Кожевникова Ю.Г. Особенности реновации городских территорий с учетом существующих ограничений // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 2 (32). С. 36–40.

20. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Основные положения концепции реинжиниринга территории и застройки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 365–376. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3. 365–376

21. Поташова М.Д., Цитман Т.О. Комплексное развитие городских территорий. Реновация микрорайона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 2 (28). С. 40–50.

22. Пономарев Е.С., Ившин К.С. Проектная стратегия территориального брендинга // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 100–107.

23. Толпинская Т.П., Альземенова Е.В., Мамаева Ю.В. Основные направления реновационного процесса в преобразовании промышленных территорий

под общественные пространства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 3 (29). С. 52–63.

24. Мурад А.Х., Курбангалеев Р.А., Хромов З.А. Реконструкция жилых зданий в г. Москва // Системные технологии. 2020. № 2 (35). С. 31–35.

25. Миролюбова Т.В., Николаев Р.С. Перспективы развития промышленных территорий крупных городов в региональной экономике // Ars Administrandi. Искусство управления. 2018. Т. 10. № 4. С. 569–597. DOI: 10.17072/2218-9173-2018-4-569-597

26. Гайдук А.Р. Реновация промышленных объектов и адаптация индустриальных зон городов к современным условиям (на примере г. Казань) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 83–88.

27. Aleksanin A. Organization of a logistics system for waste streams during the renovation of territories // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 062011. DOI: 10.1088/1757-899x/365/6/062011

28. Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. С. 13.

29. Иванова И.Б., Романов М.А. Выбор проектного решения на основе системы показателей с использованием метода парных сравнений // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2019. № 1 (36). С. 80–82.

Поступила в редакцию 16 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 18 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 30 августа 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Павел Анатольевич Журавлев — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 756279; tous2004@mail.ru;

Сергей Борисович Сборщиков — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017; sbs@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Batoyeva E.V. Determination of the most effective innovations in the field of housing construction. *Baikal Research Journal*. 2017; 8(4):25. DOI: 10.17150/2411-6262.2017.8(4).25 (rus.).

2. Kolmakova Ye.M., Kolmakova I.D., Degtyareva N.A. Spatial development of the region in the context of the strategy for socio-economic growth. *CSU Bulletin*. 2018; 3(413):30-37. (rus.).

3. Kazhuro N.Ya. Conception of sustainable development as new paradigm of social progress. *Science & Technique*. 2016; 15(6):511-520. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-6-511-520 (rus.).
4. Graboviy P. Reconstruction and modernization of industrial parks. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91(147):08028. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108028
5. Dontsov D.G., Yushkova N.G. Principles of sustainable development of the territory and priorities of architectural and urban construction activity. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 050011. DOI: 10.1063/1.4973071
6. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management. *Civil Engineering Journal*. 2016; 2(6):262. DOI: 10.28991/cej-030986
7. Pokrovsky A.M., Shumetov V.G. Expertly-analytical prognosis models in strategic management: methodological approaches and methodical tool. *Bulletin of Eurasian Science*. 2015; 7(2):57. DOI: 10.15862/87EVN215 (rus.).
8. Milykh F.G., Glitchev B.K. Expert-analytical technologies for evaluating innovative projects: comparative analysis. *Management of Economic Systems*. 2012; 12(48):120. (rus.).
9. Ataev A.M. Requirements for model evaluation of innovative projects in various stages of justification. *Transport business of Russia*. 2012; 3:15-18. (rus.).
10. Griaznova N.V., Saytibragimov A.E. Digital parametric urban planning documentation. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2021; 11(2):330-341. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-330-341 (rus.).
11. Fedchun D.O., Tlusty R.E. The comparative analysis of the methods of parametric, informational and generative architectural design. *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2018; 1(34):103-115. DOI: 10.5281/zenodo.1196721 (rus.).
12. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm. *Construction Management and Economics*. 2015; 33(5-6):453-466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982
13. Likhobabin K.A., Shevnina A.P., Pomorov S.B. Parametric methodology in the work of an architect. *Bulletin of the Altai State Technical University I.I. Polzunov*. 2015; 1-2:223-226. (rus.).
14. Gogolkina O. Constructions formation features in the parametric architecture. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 1(42):355-363. (rus.).
15. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. The reengineering of built-up areas: structure and composition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1508-1519. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1508-1519 (rus.).
16. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. Reengineering of territories: structure and composition, organizational patterns and resource provision. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(4):2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.2 (rus.).
17. Zhuravlev P.A., Sborshchikov S.B. Organizational features of the formation of technical solutions for engineering protection of the territory at the stages of the life cycle and their reengineering (part 2). *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2021; 1(33):77-91. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-77-91 (rus.).
18. Ibe E.E., Abdivaitova D.M., Shibaeva G.N. Renovation of the hydrolysis factory territory in the Khakasia republic for residential development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(3):6. (rus.).
19. Dolotkazina N.S., Kozhevnikova Yu.G. Features of urban area renovation taking into account existing restrictions. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2020; 2(32):36-40. (rus.).
20. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. Reengineering of territories and built-up areas: a conceptual framework. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(3):365-376. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.365-376 (rus.).
21. Potashova M.D., Tsitman T.O. Complex development of urban territories. Renaissance microdistrict. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2019; 2(28):40-50. (rus.).
22. Ponomarev E.S., Ivshin K.S. Territorial branding project strategy. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):100-107. (rus.).
23. Tolpinskaya T.P., Al'zemenova E.V., Mamaeva Yu.V. The main directions of the renovation process in the transformation of industrial territories into public spaces. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2019; 3(29):52-63. (rus.).
24. Murad A.I.H., Kurbangaleev R.A., Khromov Z.A. Reconstruction of residential buildings in Moscow. *System Technologies*. 2020; 2(35):31-35. (rus.).
25. Mirolubova T.V., Nikolaev R.S. Development Prospects of Large Cities' Industrial Territories in the Regional Economy. *Ars Administrandi*. 2018; 10(4):569-597. DOI: 10.17072/2218-9173-2018-4-569-597 (rus.).
26. Gaiduk A.R. Renovation of industrial facilities and adaptation of the industrial zones of the cities to modern conditions. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2016; 4(38):83-88. (rus.).
27. Aleksanin A. Organization of a logistics system for waste streams during the renovation of territories. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:062011. DOI: 10.1088/1757-899x/365/6/062011
28. Spiridonov S.B., Bulatova I.G., Postnikov V.M. Analysis of approaches to the choice of weighting criteria method of pair comparison of criteria. *Internet Journal of Science Studies*. 2017; 6(9):13. (rus.).
29. Ivanova I.B., Romanov M.A. Selection of the design solution based on the system of indicators using the method of pair comparisons. *Social and Economic Management: Theory and Practice*. 2019; 1(36):80-82. (rus.).

Received April 16, 2022.

Adopted in revised form on May 18, 2022.

Approved for publication on August 30, 2022.

B I O N O T E S: **Pavel A. Zhuravlev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 756279; tous2004@mail;

Sergej B. Sborshchikov — Doctor of Economics Sciences, Professor, Head of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017; sbs@mgsu.ru.

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.

Метод многомерного шкалирования для оценки эффективности взаимодействия предприятий инвестиционно-строительной сферы и особых экономических зон в аспекте совершенствования финансового и инновационного потенциала строительной отрасли

Далер Зарифович Искандаров, Светлана Михайловна Бороздина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются изучение и применение метода многомерного шкалирования для оценки процесса взаимодействия предприятий инвестиционно-строительной сферы (ИСС) и особых экономических зон (ОЭЗ) в целях повышения финансово-хозяйственного и инновационного потенциала строительной отрасли. Актуальность исследования обусловлена растущей значимостью использования инструментов территориального развития ОЭЗ для решения задач по осуществлению технологических изменений, направленных на рост появления инновационных проектов, которые позволяют сформировать совершенно иные подходы к обеспечению непрерывного развития в различных секторах строительства и преобразовать существующие методы оценки и анализа финансово-хозяйственного состояния предприятий ИСС в условиях взаимодействия с ОЭЗ.

Материалы и методы. Предложенный метод оценки обладает строгой научной последовательностью и соответствующей теоретической базой, которая послужила основой для его создания. Разработанный метод многомерного шкалирования для оценки изложенного в рамках исследования процесса имеет универсальную применимость для различных предприятий строительной отрасли, поскольку структурирован в соответствии с целью и задачами исследования. Ключевыми подходами, применяемыми в рамках научного поиска, послужили методы квалиметрической оценки и построение инфографических моделей взаимодействия, иллюстрирующих динамику показателей финансово-хозяйственного анализа предприятия ИСС.

Результаты. Результаты использования многомерного шкалирования предоставляют эффективный способ получения визуально-наглядной информации о перспективах взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ в динамике, характеризующейся доступностью управленческого применения для руководства предприятий и лиц, ответственных за взаимодействие. Особенность многомерного шкалирования заключается в возможности учета свойств изучаемого явления, возникающих как из внешней, так и внутренней среды, что позволяет осуществить всестороннюю оценку, отражающую данные из различных источников информации.

Выводы. Построение шкал важности и влияния организует порядок оценки исходя из профильных систем репрезентации количественных результатов, которые демонстрируют положительные и отрицательные тенденции в отклонении величин показателей в форме качественной характеристики, которую можно дополнить для дальнейших исследований в зависимости от цели научного поиска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предприятие инвестиционно-строительной сферы, особая экономическая зона, многомерное шкалирование, квалиметрия, инновации, финансы, инфографическая модель, профильные системы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Искандаров Д.З., Бороздина С.М. Метод многомерного шкалирования для оценки эффективности взаимодействия предприятий инвестиционно-строительной сферы и особых экономических зон в аспекте совершенствования финансового и инновационного потенциала строительной отрасли // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1250–1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1250-1263

Автор, ответственный за переписку: Далер Зарифович Искандаров, iskandarovdaler@gmail.com.

Method of multidimensional scaling for evaluating the effectiveness of interaction between investment and construction sector enterprises and special economic zones in the aspect of improving the financial and innovative potential of construction industry

Daler Z. Iskandarov, Svetlana M. Borozdina

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

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the study and application of method of multidimensional scaling to assess the process of interaction between enterprises of the investment and construction sector (ICS) and special economic zones (SEZ) to increase the financial, economic, and innovative potential of construction industry. The relevance of the study is due to the growing importance of using territorial development tools (SEZ) to solve the tasks of implementing technological changes aimed at increasing the emergence of a variety of innovative projects that will allow us to form completely different approaches to ensure continuous development in various construction sectors and transform existing methods of assessing and analyzing the financial and economic condition of ICS enterprises in terms of interaction with SEZ.

Materials and methods. Proposed evaluation method in the article has a strict scientific consistency and an appropriate theoretical basis, which served as the basis for its development. Developed method of multidimensional scaling for evaluating the process described in the article has universal applicability for various enterprises of construction industry, since it is structured in accordance with the purpose and objectives of the study. The key approaches that used in framework of scientific research were methods of qualimetric assessment and the construction of infographic models of interaction which illustrating the dynamics of indicators of financial and economic analysis of the ICS enterprise

Results. The results of using multidimensional scaling provide an effective way to obtain visual information about prospects of interaction between enterprises of the ICS and SEZ in dynamics, characterized by the availability of managerial application for management of enterprises and persons responsible for interaction. The peculiarity of multidimensional scaling is possibility of considering properties of phenomenon under study arising from both the external and internal environment, which allows for a comprehensive assessment reflecting data from various information sources.

Conclusions. Construction scales of importance and influence organizes the evaluation procedure based on specialized systems of representation of quantitative results that demonstrate positive and negative trends in the deviation of values of indicators in the form of a qualitative characteristic that can be supplemented for further research, depending on the purpose of scientific research.

KEYWORDS: enterprise of investment and construction sector (ICS), special economic zone (SEZ), multidimensional scaling, qualimetry, innovation, finance, infographic model, profile systems

FOR CITATION: Iskandarov D.Z., Borozdina S.M. Method of multidimensional scaling for evaluating the effectiveness of interaction between investment and construction sector enterprises and special economic zones in the aspect of improving the financial and innovative potential of construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1250-1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1250-1263 (rus.).

Corresponding author: Daler Z. Iskandarov, iskandarovdaler@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значимыми событиями, которые повлияли на инновационное развитие строительной отрасли РФ, стали продолжительные технологические изменения, вызванные усилением международной конкуренции в области финансового контроля и перехода на новую модель расчета, выраженную в отчуждении от инструмента формирования бюджетной политики, и перехода к инвестиционному методу регулирования средств [1] и вложению в наиболее перспективные наукоемкие проекты. С другой стороны — возросшая роль административных барьеров и образование искусственного дефицита земельных участков под реализацию инвестиционно-строительных проектов (ИСП) повлекло возникновение трудностей в осуществлении крупных инфраструктурных проектов, которые нуждаются в создании эффективных финансово-хозяйственных механизмов обеспечения аргументированных положений пространственного развития субъектов РФ [1, 2]. Одна из форм подобных механизмов — особые экономические зоны (ОЭЗ), которые прочно заняли положение действенного инструмента по решению проблем территориального планирования и развития. Тенденция к увеличению количества планируемых к учреждению ОЭЗ связана с характером льгот и преимуществ, которые характеризуют их как высокоэффективные площадки под реализацию ИСП или присоединению к ним в качестве производственного резидента. Перспективы

применения ОЭЗ для развития строительной отрасли очевидны — готовая инженерно-техническая и транспортная инфраструктура; широкая система льгот и налоговых преференций; земля, которая прошла необходимые предпроектные и проектные процедуры для получения статуса пригодности под возведение объектов недвижимости; и наличие свободной таможенной зоны. Одним из наиболее ярких примеров эффективности взаимодействия предприятий инвестиционно-строительной сферы (ИСС) и ОЭЗ является интенсивное строительство в ОЭЗ «Дубна», расположенной в Московской области. Резидентами этой ОЭЗ было принято решение о создании семи новых заводов и научно-производственных комплексов, что способствовало образованию на близлежащей к ОЭЗ территории жилого комплекса и нескольких детских садов [3]. При этом существуют разные аналитические итоги, которые подтверждают перспективность ОЭЗ как инструмента привлечения вложений и развития инвестиционно-строительного комплекса (ИСК) в ОЭЗ, подчеркивая важность реализации ИСП в ОЭЗ, включенных в программы строительства на федеральном и региональном уровнях посредством капитальных вложений в новое строительство, а не просто стимулирование инвестиционной активности [4].

Однако в ОЭЗ существует и ряд трудностей, которые связаны с неверно выстроенной политикой планирования по развитию и совершенствованию ОЭЗ, что привело к помехам в определении необходимых объемов осуществляемых строительных работ

и обеспечении стабильного положения доходности реализуемых ИСП [5]. Многие результаты научных исследований показывают неоднозначную оценку ОЭЗ в роли инструмента по привлечению инвестиций, что продиктовано нормативно-правовыми аспектами функционирования ОЭЗ и отсутствием понятийных связей в определении ряда терминов, которые приводят к неэффективному применению бюджетных ассигнований на совершенствование ОЭЗ и нерациональному использованию земельных участков, пригодных для строительства различных проектов [2, 6]. В своей статье В.А. Останин пришел к выводу, что инвестиционные ожидания и действительность ведения проектной деятельности в ОЭЗ в значительной степени расходятся по причине существования субъектных противоречий между участниками инвестиционного процесса в ОЭЗ [7], которые следует учитывать при ведении различной формы проектной деятельности в ОЭЗ. Кроме того, необходимым условием повышения эффективности, помимо реформирования организационных отношений, является модификация структуры финансирования и бюджетного регулирования в ОЭЗ, которая направлена на улучшение взаимодействия государственно-частного партнерства (ГЧП) [6], что влияет на перспективность и успешность реализуемых в будущем проектов. Ряд исследователей аналогичным образом установили, что одной из ключевых проблем функционирования служит перечень различного рода проблем как организационного, так и финансового характера, которые приводят к двойным стандартам в управлении ОЭЗ и формированию конфликтной парадигмы субъектного взаимодействия между потенциальными резидентами и руководством ОЭЗ [7].

Обобщая все вышесказанное, авторы статьи предлагают ввести изменения в существующие методы оценки эффективности взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ, используя метод квалиметрии, который позволяет преобразовать количественные результаты финансово-хозяйственного анализа предприятий ИСС в качественную форму посредством профильной системы репрезентации количественных результатов. Под квалиметрией понимается метод комплексной оценки, направленный на формирование множества шкал измерения в соответствии с атрибутами изучаемой системы в различных условиях и процессах, в том числе и для исследования динамики изменения числовых характеристик при взаимодействии систем различной природы возникновения [8]. Универсальная применимость данного метода обозначена множеством ученых и исследователей [9], в частности, одной из наиболее часто используемых сфер является менеджмент качества различных видов продукции, явлений или событий. В строительной отрасли методы квалиметрической оценки используются для изучения конструктивных и эксплуатационных характеристик строительных материалов в различных опытных условиях [10, 11]. Квалиметрия обла-

дает свойством комплексности по отношению к формированию атрибутов систем, поскольку демонстрирует результаты из различных направлений мониторинга изучаемого явления и предоставляет возможность формирования интегральных показателей, разительно отличающихся друг от друга не только масштабом моделируемого объекта оценки, но и функциональным назначением [12–14]. Важнейшее свойство проводимого исследования — строгая научная последовательность и базирование разрабатываемого метода шкалирования на ключевых положениях теории инфографического моделирования и теории функциональных систем П.К. Анохина [15]. Практическая значимость многомерного шкалирования в решении проблемы по обеспечению организационной и финансовой реформации ОЭЗ и возможности урегулирования внутри конфликтной субъектной парадигмы путем построения инфографических моделей взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ в условиях реализации ИСП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вышеуказанные теории инфографического моделирования и функциональных систем предполагают проведение аналитической работы по распределению данных на информационные потоки [8, 15], полученные из внешней и внутренней среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ, и их дальнейшему структурированию согласно направлениям комплексного мониторинга для оценки параметров сложных систем в условиях принятия управленческих решений. Методика исследования строится в соответствии с научной обоснованностью применения метода квалиметрической оценки, выраженной в форме построения шкал параметров изучаемой системы и разработкой профильных систем репрезентации количественных результатов по направлениям комплексного мониторинга взаимодействия сущностей (систем) различной природы возникновения [8]. Использование квалиметрии допускает возможность получения качественной оценки изучаемого процесса, используя количественные измерения [8, 16, 17], сохраняя при этом способность обобщенного изучения атрибутов системы в динамике, в процессе изменения собственной величины. Многомерное шкалирование осуществляется путем моделирования процесса взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ, в котором количественные значения направлений комплексного мониторинга распределены по параметрам изучаемой системы (субъект взаимодействия). Важным этапом в рамках исследования является визуально-наглядное моделирование процесса взаимодействия предприятий ИСС. Согласно положениям теории инфографического моделирования [8], взаимодействия и сближения сущностей различной природы возникновения, обладающих различными нормами функционирования, характеризуются двумя основополагающими фазовыми

переходами схождения: нулевая фаза, которая ознаменывает начало взаимодействия, на этой фазе субъекты (системы) существуют в состоянии покоя, а их параметры неизменны или находятся в незначительной и обратимой динамике величин; активная фаза, которая свидетельствует о начале взаимодействия и формирования обоюдных воздействий субъектов [8]. На рис. 1 проиллюстрировано графическое представление взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ при фазовых переходах сближения.

Результат пассивной фазы — необходимость в выполнении комплексного мониторинга среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ, итогом которого является формирование соответствующих направлений мониторинга. В рамках исследования авторы пришли к выводу, что комплексный мониторинг внутренней среды взаимодействия в наибольшей степени соответствует поставленной в исследовании проблеме и ее решению, по этой причине внешние информационные потоки формирования

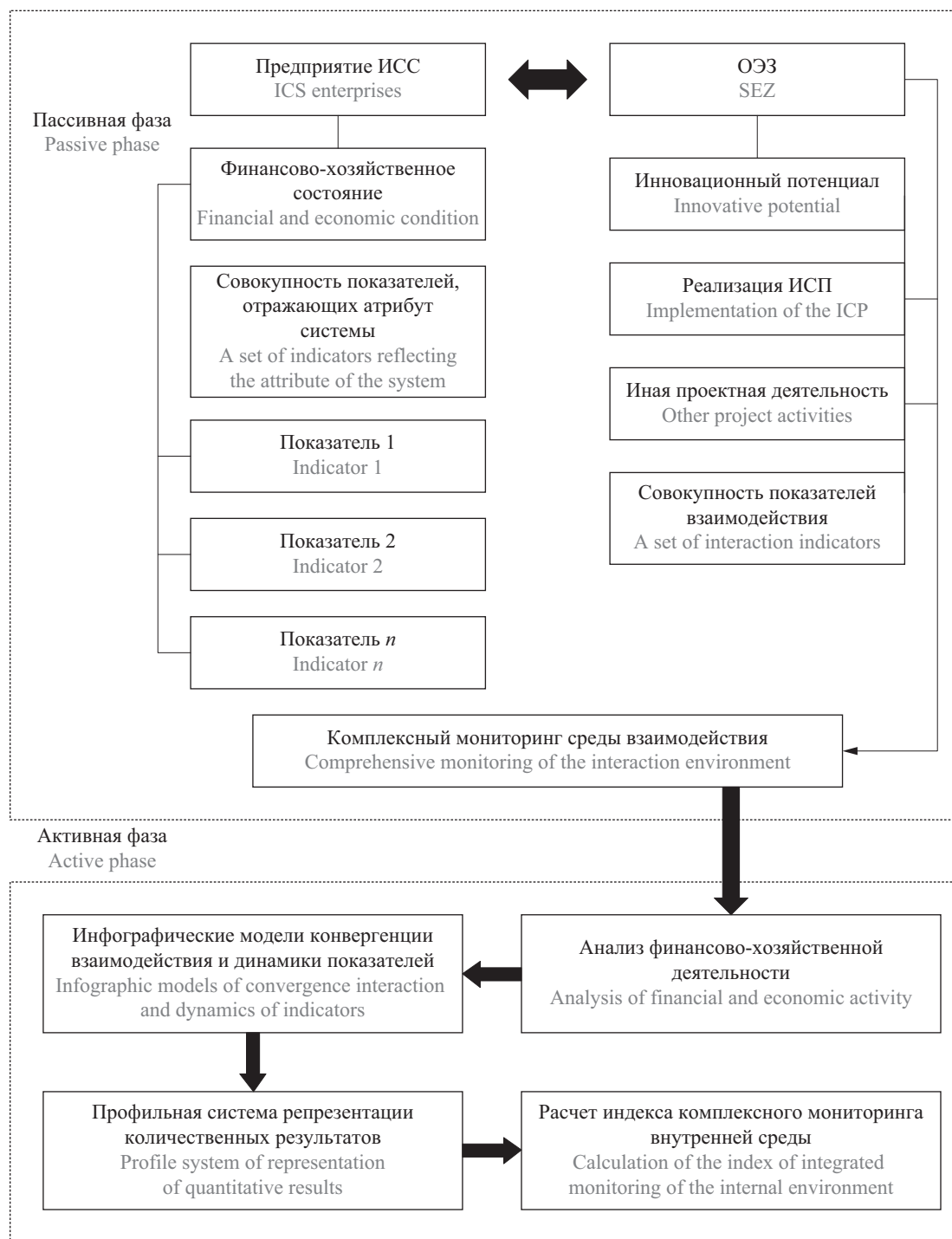


Рис. 1. Взаимодействие предприятий ИСС и ОЭЗ при фазовых переходах сближения

Fig. 1. Interaction of ICS enterprises during phases transitions of convergence

направлений мониторинга не столь подробно изложены в статье. Активная фаза взаимодействия характеризуется необходимостью проведения анализа финансово-хозяйственной деятельности (АФХД) предприятия ИСС, намеревающегося осуществлять деятельность в ОЭЗ, на этом этапе формируется совокупность показателей, отражающих определенный параметр финансового и материального состояния изучаемого предприятия [18, 19]. Функциональное назначение АФХД в обосновании причинно-следственных связей, которые раскрывают степень финансовой устойчивости и платежеспособности предприятия ИСС и его способности нести ответственность по собственным обязательствам, сохраняя стабильное и автономное экономическое существование.

Итогом проведения анализа является прогноз основных тенденций организационного и финансового развития, учитывающих пространственно-динамический характер изменений, вызванных взаимодействием с ОЭЗ [20, 21]. Документы бухгалтерской, управленческой отчетности, описывающие материальную и производственную сторону предприятия, послужили ключевыми информационными источниками для проведения АФХД. Важно отметить, что весь перечень используемых данных — это все информационные потоки, сформированные на основе отчетов и документов внутреннего пользования, характеризующих процесс взаимодействия. Подобная система организации данных связана с необходимостью декомпозиции сложноустроенного явления на более простые составляющие, чтобы оценить важ-

ность каждой из шкал квалитетической оценки согласно направлению комплексного мониторинга. Более того, результаты оценки дают возможность объединить количественные и качественные результаты в единый интегральный показатель. Учет свойств эффектов внешней и внутренней среды — важное преимущество многомерного шкалирования, поскольку создает условия для воспроизведения цельного прогноза формирования и развития изучаемого явления по частным и единичным измерениям.

Таким образом, АФХД состоит из нескольких групп показателей, которые объединены общей логической последовательностью, перечислим их: показатели финансовой устойчивости, показатели деловой активности, показатели рентабельности, показатели платежеспособности и ликвидности — комплексный анализ ликвидности.

В табл. 1 представлена краткая характеристика каждой из групп показателей в рамках АФХД.

Важно отметить, что показатели АФХД рассчитываются в обязательной последовательности между собой, поскольку синтезированы в форме совокупности абсолютных и относительных величин, которые являются производными и формируются согласно ранее проведенным расчетам.

Итог АФХД предприятия ИСС, намеревающегося осуществлять деятельность в ОЭЗ, — построение профильной системы квалитетической оценки, которая отражает выявленные положительные и отрицательные тенденции по результатам внутреннего комплексного мониторинга (табл. 2).

Табл. 1. Краткая характеристика групп показателей анализа финансово-хозяйственной деятельности

Table 1. A brief description of the groups of indicators of the analysis of financial and economic activity

Группа показателей АФХД Group of indicators for the analysis of financial and economic activity (AFEА)	Характеристика в рамках АФХД Characteristics within the framework of the AFEА
Финансовая устойчивость Financial stability	Финансовая устойчивость предприятия определяет величину и соотношение объемов собственных и заемных средств, которые необходимы для обеспечения запасов и затрат; демонстрирует структуру капитала предприятия и его платежеспособность The financial stability of the enterprise determines the amount and ratio of the volumes of own and borrowed funds that are necessary to ensure reserves and costs; demonstrates the capital structure of the enterprise and its solvency
Деловая активность Business activity	Оценка деловой активности предприятия, которая связана с определением эффективности использования и оборачиваемости активов; скорость оборота капитала напрямую влияет на платежеспособность, поскольку отражает возможность формирования денежных средств Assessment of the business activity of an enterprise, which is associated with determining the efficiency of use and turnover of assets; the rate of capital turnover directly affects solvency, since it reflects the possibility of generating cash
Рентабельность Profitability	Раскрывает доходность вложений и величину получаемой прибыли на единицу стоимости собственного капитала и формирования инвестиционной политики и выбора оптимальных для реализации проектов Reveals the profitability of investments and the amount of profit received per unit cost of equity and the formation of investment policy and the selection of optimal projects for implementation

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Группа показателей АФХД Group of indicators for the analysis of financial and economic activity (AFEА)	Характеристика в рамках АФХД Characteristics within the framework of the AFEА
Платежеспособность и ликвидность Solvency and liquidity	Способность предприятия нести ответственность по собственным финансовым обязательствам связана с его платежеспособностью, которая характеризуется ликвидностью — свойством средств оборачиваться в денежную форму, исключая риск потери собственной балансовой стоимости The ability of an enterprise to bear responsibility for its own financial obligations is related to its solvency, which is characterized by liquidity — the property of funds to turn into monetary form, excluding the risk of loss of its own book value
Комплексный анализ ликвидности Comprehensive liquidity analysis	Анализ ликвидности баланса путем распределения имеющихся активов предприятия от наиболее ликвидным к наименее. Аналогичным образом группируются и статьи пассива баланса в соответствии со срочностью их оплаты Analysis of the liquidity of the balance sheet by distributing the company's existing assets from the most liquid to the least. Similarly, the items of the balance sheet liability are grouped in accordance with the urgency of their payment

Табл. 2. Профильная система репрезентации количественных результатов АФХД

Table 2. Profile system of representation of quantitative AFEА results

Направление АФХД AFEА direction	Положительные тенденции Positive trends	Негативные тенденции Negative trends
Финансовая устойчивость Financial stability	Увеличение доли собственного капитала в общем объеме средств Increase in the share of equity in the total amount of funds	Высокий объем за кредитованности High volume of crediting
Деловая активность Business activity	Снижение срока оборачиваемости материальных запасов Reduction of the inventory turnover period	Увеличение продолжительности операционного цикла Increasing the duration of the operating cycle
Рентабельность Profitability	Повышение рентабельности собственного капитала Improving return on equity	Снижение длительности периода окупаемости собственного капитала Reducing the duration of the payback period of equity
Платежеспособность Solvency	Рост обеспеченности собственными средствами Growth of provision with own funds	Недостаточный уровень текущей ликвидности Insufficient level of current liquidity
Ликвидность Liquidity	Повышение совокупного объема ликвидных активов в структуре баланса Increase in the total volume of liquid assets in the balance sheet structure	Рост доли медленно реализуемых активов Growth in the share of slow-selling assets

Степень интенсивности и значимости проявления тенденций в процессе взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ в аспекте использования АФХД характеризуется конвергенцией, которая демонстрирует динамику изменения показателей в непосредственном процессе по сближению субъектов, оказывающих обоюдное влияние друг на друга [22–26]. Под конвергенцией понимаются перспективы появления принципиально новых и единых черт у обеих сторон схождения, которое в рамках предмета исследования может быть выражено в образовании совершенно иных интегративных единиц [15, 25],

обладающих комплексными и совокупными признаками в результате взаимодействия [8, 15]. На рис. 2 приведена динамическая конвергенция показателей мониторинга внутренней среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ, позволяющая сделать вывод о наличии результирующих влияний между субъектами по отношению друг к другу.

Таким образом, по результатам применения методологии исследования было установлено, что фазовые переходы взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ в аспекте совершенствования финансового и инновационного потенциалов [25] строительной

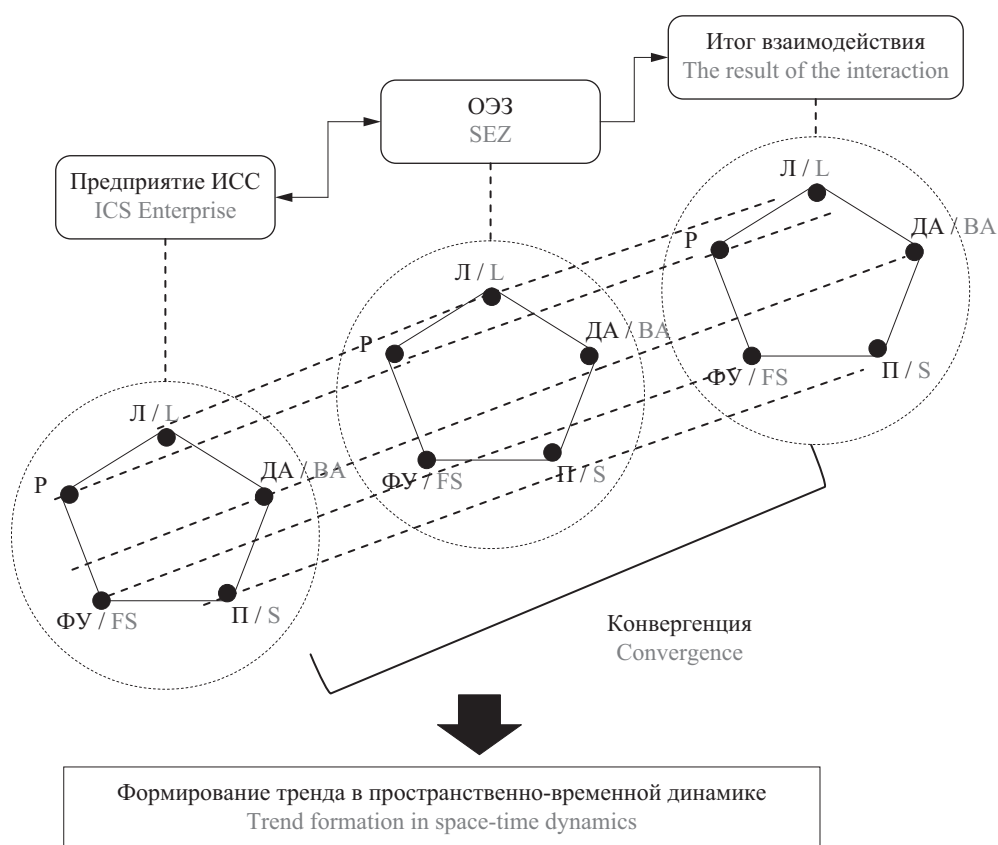


Рис. 2. Динамическая конвергенция показателей мониторинга внутренней среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ: ФУ — финансовая устойчивость; ДА — деловая активность; Р — рентабельность; П — платежеспособность; Л — ликвидность

Fig. 2. Dynamic convergence of indicators for monitoring the internal environment of interaction between ICS enterprises and SEZ: FS — financial stability; BA — business activity; P — profitability; S — solvency; L — liquidity

отрасли лежат в основе применения метода квалитетической оценки и многомерного шкалирования, направленного на формирование количественной оценки явления, которая в дальнейшем преобразуется в качественную характеристику благодаря профильной системе репрезентации количественных результатов, отражающей положительные и отрицательные тенденции комплексного мониторинга внутренней среды, выраженного осуществлением АФХД предприятия ИСС. Кроме того, конвергенция и сближение субъектов, имеющих разные нормы функционирования, позволяет осуществить прогноз перспектив взаимодействия, где становится возможным появление принципиально новых форм объединения предприятий ИСС и ОЭЗ, обладающих сходными чертами [27, 28].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании проведенных исследований визуально-наглядной формой представления многомерного шкалирования является инфографическая модель звездчатого вида (рис. 3), которая иллюстрирует степень важности и влияния различных групп показателей АФХД и направления комплексного

мониторинга, связанного с изучением данных, содержащихся во внутренней информационной среде взаимодействия.

Сформированная звездчатая модель — это многогранник, на углах которого распределены группы показателей АФХД, выражающие определенную величину графически, что позволяет сделать вывод о значимости влияния каждого отдельного показателя направления финансового анализа предприятия. Совокупность подобных моделей дает возможность выявить тренд и его преобразования на протяжении всего процесса наблюдений в условиях взаимодействия, что содействует образованию и использованию прогнозов, которые легко воспроизвести повторно. Точность и объективность полученных значений обусловлена отсутствием надобности в привлечении к работе экспертов — все количественные результаты получены в ходе проведения математических операций, а распределены в соответствии с величиной отклонения фактических плановых значений, которые рассчитываются как сумма разности между величинами показателей между собой. Эффективность звездчатых моделей заключается в предоставлении наглядной формы изменения показателей мониторинга внутренней среды, что допускает возможность

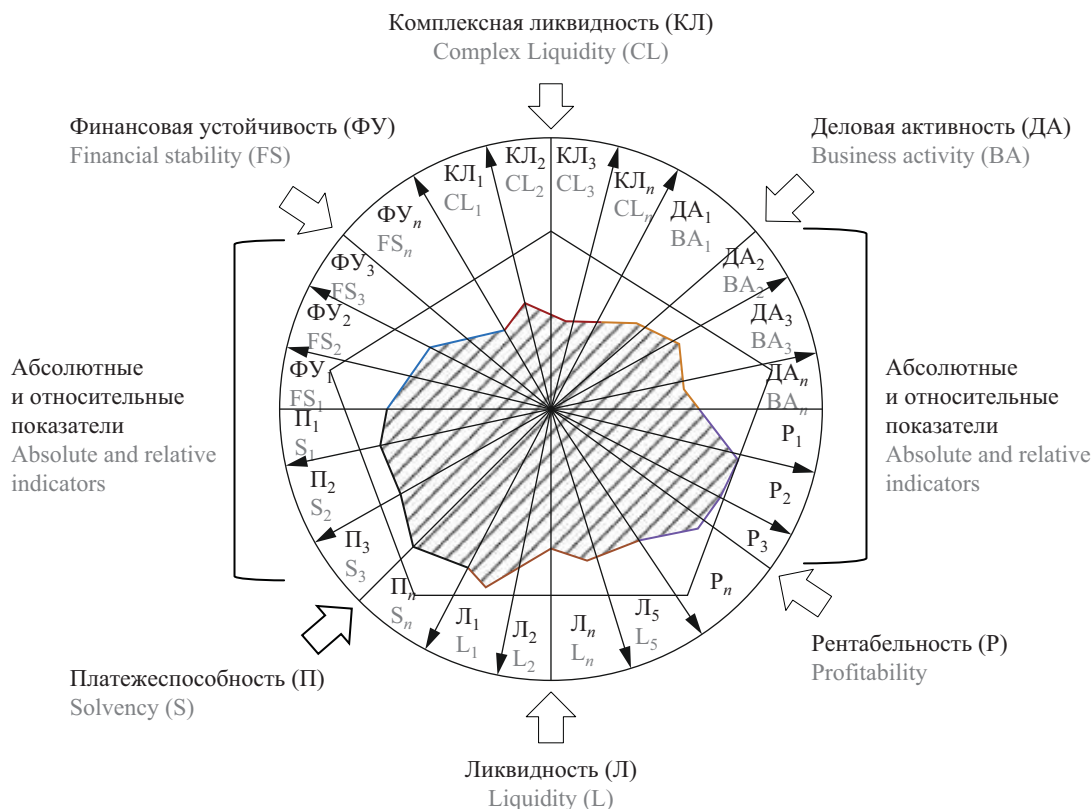


Рис. 3. Инфографическая модель важности и влияния направлений комплексного мониторинга внутренней среды

Fig. 3. Infographic model of the importance and influence of the directions of integrated monitoring of the internal environment

интерпретировать количественные данные в качественную конфигурацию, которая отражает изменения направлений АФХД в динамике, демонстрируя те значения, которые в наибольшей степени изменились в результате взаимодействия с ОЭЗ.

Преимущество инфографического моделирования также заключается в оценке интенсивности и степени важности отдельных показателей или групп, которые изменили финансово-материальный потенциал изучаемого предприятия. Для точности определения характера изменений и динамики показателей следует ввести шкалу измерений, ориентированную на разъяснение итогов расчета количественных показателей АФХД [29]. Ранее в исследовании была сформирована профильная система репрезентации количественных результатов АФХД предприятия, как часть комплексного мониторинга среды взаимодействия с ОЭЗ. В ходе научного исследования авторы предлагают ввести изменения в профильную систему, добавив помимо характеристик положительных и отрицательных тенденций также расчет величин отклонения показателей (табл. 3).

Распределение величин отклонения осуществляется и оценивается на основе шкалы динамики изменения показателей от 0 до 5 (0 — отсутствие отклонения, 1 — незначительное, 2 — заметное, 3 — осязаемое, 4 — значительное, 5 — весьма значимое). В результате расчета значений показателей устанавливается разность между плановыми и фак-

тическими значениями, которые ориентированы на получение выводов и итогов в отношении прогноза тенденций изменения и динамики направлений АФХД. Ключевым условием применения метода квалиметрической оценки является формирование профильной системы репрезентации результатов, которая дополнена оценкой степени интенсивности и значимости проявления положительных и отрицательных тенденций. Использование данного подхода оценки позволяет провести преобразование количественных результатов в качественный вид, обладающий важной управленческой ценностью для принятия решений по взаимодействию предприятий ИСС и ОЭЗ для лиц и руководителей, ответственных за создание прочных субъектных связей [30, 31].

Таким образом, итогом разработки профильной системы репрезентации количественных результатов, учитывающей величины отклонения плановых значений показателей от фактических, служит расчет индекса комплексного мониторинга внутренней среды, который рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{в.м}} = 5 + \sum \text{BO поз} - \sum \text{BO отр}, \quad (1)$$

где 5 — это базовое значение шкалы динамики изменения показателей финансово-хозяйственного анализа комплексного мониторинга внутренней среды предприятия ИСС, принимаемое как наилучший результат ранжирования. В индекс комплексного мониторинга внутренней среды вносятся все

Табл. 3. Профильная система репрезентации количественных результатов, учитывающая величины отклонения плановых значений показателей от фактических

Table 3. Profile system of representation of quantitative results, considering the deviation of the planned values of indicators from the actual

Направление АФХД AFEA direction	Группы показателей Groups of indicators	Положительная тенденция Positive trend	Значение показателя The value of the indicator		Результат ранжирования Ranking result
		Отрицательная тенденция Negative trend	Плановое (П) Planned (P)	Фактическое (Ф) Actual (A)	
Финансовая устойчивость Financial stability	ФУ _n FS _n	Увеличение доли собственного капитала Increase in the share of equity	П / Р	Ф / А	П–Ф P–A
		Высокий объем закредитованности High volume of crediting			П–Ф P–A
Деловая активность Business activity	ДА _n BA _n	Снижение срока оборачиваемости материальных запасов Reduction of the inventory turnover period	П / Р	Ф / А	П–Ф P–A
		Увеличение продолжительности операционного цикла Increasing the duration of the operating cycle			П–Ф P–A
Рентабельность Profitability	Р _n	Повышение рентабельности собственного капитала Improving return on equity	П / Р	Ф / А	П–Ф P–A
		Снижение длительности периода окупаемости собственного капитала Reducing the duration of the payback period of equity			П–Ф P–A
Платежеспособность Solvency	П _n S _n	Рост обеспеченности собственными средствами Growth of provision with own funds	П / Р	Ф / А	П–Ф P–A
		Недостаточный уровень текущей ликвидности Insufficient level of current liquidity			П–Ф P–A
Ликвидность Liquidity	Л _n L _n	Повышение совокупного объема ликвидных активов в структуре баланса Increase in the total volume of liquid assets in the balance sheet structure	П / Р	Ф / А	П–Ф P–A
		Рост доли медленно реализуемых активов Growth in the share of slow-selling assets			П–Ф P–A

значения отклонений положительных $\sum_{BO\text{ поз}}$ и отрицательных характеристик $\sum_{BO\text{ отр}}$. Полученное значение индекса в дальнейшем необходимо верно раскрыть и интерпретировать согласно принятым шкалам измерения отклонения показателей и существующему способу нормирования результатов на основе заранее утвержденных и принятых допустимых значений, которые изложены в бухгалтерской и управленческой отчетности анализируемого предприятия ИСС. Итогом расчета индекса комплексного мониторинга является получение интегрального результата, учитывающего совокупность различных показателей, объединенных общим направлением комплексного мониторинга внутренней среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ. Результат проведенного авторами исследования — обоснование применения метода квалиметрической оценки, выраженной в построении шкал измерения величин отклонения показателей по отрицательным и положительным тенденциям АФХД, и методика создания инфографических моделей конвергенции и динамики комплексного мониторинга внутренней среды взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ. Перспективность изложенного метода оценки заключается в возможности совмещения финансовых результатов деятельности и преимуществ ОЭЗ, которые способствуют осуществлению конвергенции и сближению различных сущностей, имеющих специфические нормы функционирования. Более того, успешное применение моделей конвергенции делает возможным осуществление прогнозов взаимодействия, которые могут стать успешным и простым методом для применения в управленческой деятельности для руководства предприятий ИСС и ОЭЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование метода квалиметрической оценки и многомерного шкалирования для изучения взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ — это эффективный и простой инструмент наблюдения, прогнозирования и определения тенденций развития строительной отрасли, учитывающих аспекты совершенствования инновационного потенциала, финансового и организационного регулирования по решению проблемы недостаточной инвестиционной эффективности ОЭЗ и наличию внутри конфликтной субъектной парадигмы, которая пагубно влияет на работу ОЭЗ и способствует появлению двойных стандартов в отношении управленческих процессов по формированию эффективной структуры по контролю отношений между участниками взаимодействия [6]. Существование недостатков в нормативно-правовом поле по установлению понятийной логики послужило причиной нерационального распределения бюджетных ассигнований, что привело к необходимости создания инструментов по реформации структуры финансирования ОЭЗ и уделению большего внимания механизму ГЧП при формировании

источников финансирования, реализуемых в ОЭЗ проектов [7].

В этой связи роль метода квалиметрической оценки заключается в обосновании значимости финансового состояния предприятий ИСС на принятие эффективных управленческих решений, которые подкреплены, помимо количественного и качественного содержания, инфографическими моделями динамики показателей и конвергенции участников взаимодействия. Инфографическое моделирование изучаемого процесса направлено на визуально-наглядную демонстрацию изменения показателей, отражая степень значимости и влияния каждого показателя АФХД. Использование совокупности моделей создает условия для выявления тренда изменений, который можно анализировать в динамике, изучив отдельные направления комплексного мониторинга внутренней среды, и выделить те, которые в наибольшей степени влияют на процесс взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ.

Учет положительных и отрицательных тенденций при анализе финансового состояния предприятий создает условия для преобразования количественных значений показателей в качественную форму, которая обладает универсальностью применения и простотой восприятия, что имеет особую практическую ценность для принятия управленческих решений в оперативной обстановке, когда нет возможности осуществить полноценный сложно структурированный анализ. Возможность декомпозиции процесса взаимодействия на составляющие — это одно из ключевых преимуществ метода многомерного шкалирования, которое связано с упрощением многокомплексного явления на простые действия. Как один из важнейших результатов научного исследования представлен индекс комплексного мониторинга внутренней среды, объединяющий количественные и качественные характеристики в единый интегральный итог, дающий возможность сделать вывод об эффективности взаимодействия предприятий ИСС и ОЭЗ на основании одного из направлений мониторинга. Кроме того, индекс лишен надобности в привлечении экспертов, поскольку оценка строится путем вычитания величин отклонения положительных и отрицательных характеристик, полученных по итогам ранее проведенного АФХД, и предполагает возможность ранжирования согласно разнице между плановыми и фактическими величинами. Перспективы развития исследований, изложенных в статье, обширны, метод многомерного шкалирования применим и по отношению к другим направлениям комплексного мониторинга, явлениям или событиям. Авторы статьи предполагают, что дальнейшие научные поиски в направлении метода многомерного шкалирования можно использовать при изучении полного сходжения предприятий ИСС и ОЭЗ при различных условиях [30–34], отразив те направления комплексного мониторинга, которые повлияют на конвергенцию субъектов обоюдного воздействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гневанов М.В. Преимущества, возможности и проблемы предприятий инвестиционно-строительного комплекса, функционирующих на территории ОЭЗ промышленного типа // *Недвижимость: экономика, управление*. 2017. № 4. С. 73–76.
2. Меджидов З.У. Нормативно-правовые аспекты создания и проблемы функционирования особых экономических зон в России // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Экономика и управление*. 2017. № 2 (29). С. 85–91. DOI: 10.18323/2221-5689-2017-2-85-91
3. Семь новых заводов строится в ОЭЗ «Дубна» // *Инновации*. 2013. № 8 (178). С. 3–4.
4. Ольхов М.П., Исмаилов Ф.М., Авагян А.А., Мкртчян А.А., Оганнисян С.Р. Анализ возможностей и проблем предприятий инвестиционно-строительного комплекса // *Экономика и предпринимательство*. 2017. № 12–4 (89). С. 456–459.
5. Ниязбекова Ш.У., Назаренко О.В., Буневич К.Г., Иванова О.С. Особые экономические зоны России: анализ, проблемы и пути их решения // *Научный вестник: финансы, банки, инвестиции*. 2019. № 2 (47). С. 213–222.
6. Рыбаков С.А. Реформирование российской модели особых экономических зон: правовые инструменты и перспективы // *Право и экономика*. 2010. № 10. С. 18–21.
7. Останин В.А. Инвестиционные ожидания на территориях особых экономических зон // *Современные тенденции, перспективы развития экономики и управления в странах АТР : мат. III евразийской науч.-практ. конф. с междунар. участием*. 2016. С. 327–334.
8. Чулков В.О., Комаров Н.М., Левин И.А. Инфографическое моделирование многокомпонентных систем // *Сервис в России и за рубежом*. 2014. № 4 (51). С. 218–233. DOI: 10.12737/4867
9. Косарева А.В. Квалиметрическая оценка управленческих решений в системе менеджмента качества : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2010. 18 с.
10. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка механических характеристик кольцевых образцов, полученных при высокоскоростных испытаниях на растяжение // *Сборник науч. тр. SWorld*. 2012. Т. 7. № 3. С. 3–5.
11. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов при ударном воздействии // *Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций : XXVI Междунар. конф.* 2015. С. 31–32.
12. Любаева В.А., Лукина О.А. Совершенствование методов квалиметрической оценки деятельности бизнес-систем с использованием методов многокритериальной оценки и математического моделирования // *Россия и Санкт-Петербург: экономика и образование в XXI веке : сб. докл.* 2015. С. 187–189.
13. Умывакин В.М., Леденева Т.М., Швеиц А.В. Модифицированный алгоритм пересчета интегральной квалиметрической оценки сложных объектов для целей комплексного мониторинга // *Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф.* 2017. С. 1654–1659.
14. Леденева Т.М., Умывакин В.М., Швеиц А.В. Методологические основы построения неаддитивных квалиметрических моделей интегральной оценки экологического состояния природно-хозяйственных геосистем // *Вопросы науки*. 2016. Т. 1. С. 58–73.
15. Чулков В.О., Рахмонов Э.К. Многоуровневое инфографическое моделирование в мышлении // *Мир науки*. 2013. № 2. С. 9.
16. Абенова А.М., Темербаева Ж.А. Квалиметрическая оценка качества продукции в системе менеджмента качества // *Наука и техника Казахстана*. 2020. № 2. С. 6–13.
17. Чекарчев А.Н. Квалиметрия и управление качеством. Ч. 1: Квалиметрия : учеб. пособие. Самара : Изд-во СГАУ, 2010. 171 с.
18. Song Y., Deng R., Liu R., Peng Q. Effects of special economic zones on FDI in emerging economies: Does institutional quality matter? // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 20. P. 8409. DOI: 10.3390/su12208409
19. Fu R. Research on motivation and benefits of Hongdou group's investment in Sihanoukville special economic zone in Cambodia // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 214. P. 01033. DOI: 10.1051/e3s-conf/202021401033
20. Kowalski A.M. Towards an Asian model of clusters and cluster policy: The super cluster strategy // *Journal of Competitiveness*. 2020. Vol. 12. Issue 4. Pp. 74–90. DOI: 10.7441/joc.2020.04.05
21. Ciżkowicz P., Ciżkowicz-Pękała M., Pękała P., Rzońca A. Why do some special economic zones attract more firms than others? Panel data analysis of polish special economic zones // *Prague Economic Papers*. 2021. Vol. 30. Issue 1. Pp. 61–89. DOI: 10.18267/j.pep.763
22. Devereux M., Griffith R., Simpson H. Firm location decisions, regional grants and agglomeration externalities // *Journal of Public Economics*. 2007. Vol. 91. Issue 3–4. Pp. 413–435. DOI: 10.1016/j.jpubeco.2006.12.002
23. Head K., Ries J., Swenson D. Attracting foreign manufacturing: investment promotion and agglomeration // *Regional Science and Urban Economics*. 1999. Vol. 29. Issue 2. Pp. 197–218. DOI: 10.1016/S0166-0462(98)00029-5

24. Bondonio D., Engberg J. Enterprise zones and local employment: evidence from the states' programs // *Regional Science and Urban Economics*. 2000. Vol. 30. Issue 5. Pp. 519–549. DOI: 10.1016/s0166-0462(00)00042-9
25. Lu Y., Wang J., Zhu L. Place-Based policies, creation, and agglomeration economies: Evidence from China's economic zone program // *American Economic Journal: Economic Policy*. 2019. Vol. 11. Issue 3. Pp. 325–360. DOI: 10.1257/pol.20160272
26. FIAS (Foreign Investment Advisory Service). Special economic zones. Performance, lessons learned, and implications for zone development. Washington DC : World Bank, 2008.
27. Fri W., Pehrsson T., Söilen K.S. How phases of cluster development are associated with innovation — the case of China // *International Journal of Innovation Science*. 2013. Vol. 5. Issue 1. Pp. 31–44. DOI: 10.1260/1757-2223.5.1.31
28. Aggarwal A. Economic impacts of SEZs: Theoretical approaches and analysis of newly notified SEZs in India // MPRA (Munich Personal RePEc Archive) Working Paper No. 20902. 2010.
29. Ciżkowicz P., Ciżkowicz-Pękała M., Pękała P., Rzońca A. The effects of special economic zones on employment and investment: a spatial panel modeling perspective // *Journal of Economic Geography*. 2016. P. lbw028. DOI: 10.1093/jeg/lbw028
30. Porter M.E. Clusters and economic policy: Aligning public policy with the new economics of competition, white paper, institute for strategy and competitiveness // Harvard Business School. 2007.
31. Phelps N.A. Cluster or capture? Manufacturing foreign direct investment, external economies and agglomeration // *Regional Studies*. 2008. Vol. 42. Issue 4. Pp. 457–473. DOI: 10.1080/00343400701543256
32. Iritié B.G.J.J. Economic issues of innovation clusters-based industrial policy: a critical overview // *Global Business and Economics Review*. 2018. Vol. 20. Issue 3. P. 286. DOI: 10.1504/GBER.2018.091707
33. Jankowska B., Götz M. Internationalization intensity of clusters and their impact on firm internationalization: the case of Poland // *European Planning Studies*. 2017. Vol. 25. Issue 6. Pp. 958–977. DOI: 10.1080/09654313.2017.1296111
34. Lehmann T., Benner M. Cluster policy in the light of institutional context — A comparative study of transition countries // *Administrative Sciences*. 2015. Vol. 5. Issue 4. Pp. 188–212. DOI: 10.3390/admsci5040188

Поступила в редакцию 1 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 12 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 19 сентября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Далер Зарифович Искандаров — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1101400, Scopus: 57224202746, ResearcherID: AAC-5811-2022, ORCID: 0000-0002-5851-7040; iskandarovdaler@gmail.com;

Светлана Михайловна Бороздина — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 654497, Scopus: 57194450904, ResearcherID: AAM-6451-2020, ORCID: 0000-0002-7198-4655; BorozdinaSM@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Искандаров Д.З. — идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Бороздина С.М. — научное руководство, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gnevanov M.V. Advantages, opportunities and problems of enterprises of the investment-construction complex that operate on the territory of special economic zone (SEZ) of industrial type. *Real Estate: Economics, Management*. 2017; 4:73-76. (rus.).
2. Medzhidov Z.U. Regulatory aspects of creation and the issues of functioning of special economic zones in Russia. *Science Vector of Togliatti State University. Series: Economics and Management*. 2017; 2(29):85-91. DOI: 10.18323/2221-5689-2017-2-85-91 (rus.).
3. Seven new plants are being built in the Dubna SEZ. *Innovations*. 2013; 8(178):3-4. (rus.).
4. Olkhov M.P., Ismailov F.M., Avagyan A.A., Mkrtchyan A.A., Ogannesyan S.R. Analysis of opportunities and problems of enterprises of the investment and construction complex. *Economics and Entrepreneurship*. 2017; 12-4(89):456-459. (rus.).
5. Niyazbekova Sh.U., Nazarenko O.V., Bunevich K.G., Ivanova O.S. Special Economic Zones of Russia: analysis, problems and ways to solve them.

Scientific Bulletin: Finance, Banks, Investments. 2019; 2(47):213-222. (rus.).

6. Rybakov S.A. Reforming Russian model of special economic zones: legal tools and perspectives. *Law and Economics*. 2010; 10:18-21. (rus.).

7. Ostanin V.A. Investment expectations in the territories of special economic zones. *Modern trends, prospects for the development of economics and management in the Asia-Pacific countries : materials of the III Eurasian Scientific and Practical Conference with international participation*. 2016; 327-334. (rus.).

8. Chulkov V.O., Komarov N.M., Levin I.A. Infographical modelling of multicomponent systems. *Services in Russia and abroad*. 2014; 4(51):218-233. DOI: 10.12737/4867 (rus.).

9. Kosarevskaya A.V. *Qualimetric assessment of management decisions in the quality management system : abstract of the dissertation ... Candidate of Technical Sciences*. Tula, 2010; 18. (rus.).

10. Atroshenko S.A., Griбанov D.A. Qualimetric evaluation of mechanical characteristics of ring samples obtained during high-speed tensile tests. *Collection of scientific papers SWorld*. 2012; 7(3):3-5. (rus.).

11. Atroshenko S.A., Griбанov D.A. Qualimetric evaluation technique of metal materials fracture resistance under shock loading. *Mathematical and computer modeling in mechanics of deformable media and structures : XXVI International Conference*. 2015; 31-32. (rus.).

12. Lyubaeva V.A., Lukina O.A. Improvement of methods of qualimetric assessment of business systems using methods of multi-criteria assessment and mathematical modeling. *Russia and St. Petersburg: economics and education in the XXI century : collection of reports*. 2015; 187-189. (rus.).

13. Umyvakin V.M., Ledeneva T.M., Shvets A.V. Modified algorithm for recalculation of integral qualimetric assessment of complex objects for the purposes of integrated monitoring. *Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics : proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2017; 1654-1659. (rus.).

14. Ledeneva T.M., Umyvakin V.M., Shvets A.V. Methodological foundations for the construction of non-additive qualimetric models of integral assessment of the ecological state of natural and economic geosystems. *Questions of Science*. 2016; 1:58-73. (rus.).

15. Chulkov V., Rakhmonov E. Multi-stage infographics modeling in power of apprehension activity. *World of Science. Pedagogy and psychology*. 2013; 2:9. (rus.).

16. Abenova A.M., Temerbaeva Z.A. Qualimetric assessment of product quality in the quality management system. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2020; 2:6-13. (rus.).

17. Chekmarev A.N. *Qualimetry and quality management. Vol. I. Qualimetry*. Samara, Publishing House of Samara State Aerospace University, 2010; 171. (rus.).

18. Song Y., Deng R., Liu R., Peng Q. Effects of special economic zones on FDI in emerging economies:

Does institutional quality matter? *Sustainability*. 2020; 12(20):8409. DOI: 10.3390/su12208409

19. Fu R. Research on motivation and benefits of Hongdou group's investment in Sihanoukville special economic zone in Cambodia. *E3S Web of Conferences*. 2020; 214:01033. DOI: 10.1051/e3sconf/202021401033

20. Kowalski A.M. Towards an Asian model of clusters and cluster policy: The super cluster strategy. *Journal of Competitiveness*. 2020; 12(4):74-90. DOI: 10.7441/joc.2020.04.05

21. Ciżkowicz P., Ciżkowicz-Pękała M., Pękała P., Rzońca A. Why do some special economic zones attract more firms than others? Panel data analysis of polish special economic zones. *Prague Economic Papers*. 2021; 30(1):61-89. DOI: 10.18267/j.ppep.763

22. Devereux M., Griffith R., Simpson H. Firm location decisions, regional grants and agglomeration externalities. *Journal of Public Economics*. 2007; 91(3-4): 413-435. DOI: 10.1016/j.jpubeco.2006.12.002

23. Head K., Ries J., Swenson D. Attracting foreign manufacturing: investment promotion and agglomeration. *Regional Science and Urban Economics*. 1999; 29(2):197-218. DOI: 10.1016/S0166-0462(98)00029-5

24. Bondonio D., Engberg J. Enterprise zones and local employment: evidence from the states' programs. *Regional Science and Urban Economics*. 2000; 30(5):519-549. DOI: 10.1016/S0166-0462(00)00042-9

25. Lu Y., Wang J., Zhu L. Place-based policies, creation, and agglomeration economies: Evidence from China's economic zone program. *American Economic Journal: Economic Policy*. 2019; 11(3):325-360. DOI: 10.1257/pol.20160272

26. FIAS (Foreign Investment Advisory Service). *Special Economic Zones. Performance, Lessons Learned, and Implications for Zone Development*. Washington DC, World Bank, 2008.

27. Fri W., Pehrsson T., Søylen K.S. How phases of cluster development are associated with innovation — the case of China. *International Journal of Innovation Science*. 2013; 5(1):31-44. DOI: 10.1260/1757-2223.5.1.31

28. Aggarwal A. Economic impacts of SEZs: Theoretical approaches and analysis of newly notified SEZs in India. *MPRA (Munich Personal RePEc Archive) Working Paper No. 20902*. 2010.

29. Ciżkowicz P., Ciżkowicz-Pękała M., Pękała P., Rzońca A. The effects of special economic zones on employment and investment: a spatial panel modeling perspective. *Journal of Economic Geography*. 2016; lbw028. DOI: 10.1093/jeg/lbw028

30. Porter M.E. Clusters and economic policy: Aligning public policy with the new economics of competition, white paper, institute for strategy and competitiveness. *Harvard Business School*. 2007.

31. Phelps N.A. Cluster or capture? Manufacturing foreign direct investment, external economies and agglomeration. *Regional Studies*. 2008; 42(4):457-473. DOI: 10.1080/00343400701543256

32. Iritié B.G.J.J. Economic issues of innovation clusters-based industrial policy: a critical overview. *Global Business and Economics Review*. 2018; 20(3):286. DOI: 10.1504/GBER.2018.091707

33. Jankowska B., Götz M. Internationalization intensity of clusters and their impact on firm internationaliza-

tion: the case of Poland. *European Planning Studies*. 2017; 25(6):958-977. DOI: 10.1080/09654313.2017.1296111

34. Lehmann T., Benner M. Cluster policy in the light of institutional context — A comparative study of transition countries. *Administrative Sciences*. 2015; 5(4):188-212. DOI: 10.3390/admsci5040188

Received September 1, 2022.

Adopted in revised form on September 12, 2022.

Approved for publication on September 19, 2022.

B I O N O T E S : **Daler Z. Iskandarov** — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1101400, ORCID: 0000-0002-5851-7040, Scopus: 57224202746, ResearcherID: AAC-5811-2022, iskandarovdaler@gmail.com;

Svetlana M. Borozdina — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 654497, Scopus: 57194450904, ResearcherID: AAM-6451-2020, ORCID: 0000-0002-7198-4655; BorozdinaSM@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Daler Z. Iskandarov — idea, collection of material, processing of material, writing an article.

Svetlana M. Borozdina — scientific guidance, revision of the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Стейкхолдерский подход к инновационному развитию единых теплоснабжающих организаций

Валерия Викторовна Глазкова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Положение о том, что любой хозяйствующий субъект в экономической системе не существует обособленно от среды, которая его окружает, создает необходимость при функционировании и развитии организации учитывать цели основных заинтересованных сторон. Объектом исследования являются единые теплоснабжающие организации (ЕТО), выступающие одним из участников теплоснабжения, за которым законодательно закреплена ответственность за модернизацию и технологическое развитие теплоснабжения на определенной территории. Взаимодействие ЕТО с другими хозяйствующими субъектами и держателями интересов оказывает влияние на характер и интенсивность осуществления модернизации, технологического и инновационного развития. Цель исследования — выделение групп стейкхолдеров, взаимодействие с которыми важно для инновационного развития ЕТО, а также определение их основных целей и интересов для того, чтобы иметь возможность учитывать их при разработке механизма управления инновационным развитием ЕТО.

Материалы и методы. Теоретической и методологической основой послужили работы российских и зарубежных авторов, посвященные стейкхолдерскому подходу к управлению. Применялись методы эмпирического и теоретического исследования.

Результаты. Изучение подходов российских и зарубежных авторов к классификации стейкхолдеров позволило сформировать перечень основных стейкхолдеров, заинтересованных в инновационном развитии ЕТО, а также выделить их основные цели, что представляет интерес, так как идентификация, структуризация и построение карты возможных стейкхолдеров дает возможность оценить варианты функционирования и развития объекта исследования с точки зрения существующих заинтересованных групп и их влияния.

Выводы. Системный подход к управлению заинтересованными в инновационном развитии ЕТО группами, основанный на критерии оптимальности, должен стать важной составляющей при разработке механизма управления рассматриваемым процессом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплоснабжение, единые теплоснабжающие организации, инновации, инновационное развитие, инновационное развитие единых теплоснабжающих организаций, стейкхолдер, теория стейкхолдеров, стейкхолдерский подход

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глазкова В.В. Стейкхолдерский подход к инновационному развитию единых теплоснабжающих организаций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1264–1275. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1264-1275

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

Stakeholder approach to the innovative development of unified heat supply organizations

Valeria V. Glazkova

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

ABSTRACT

Introduction. The provision that any economic entity in the economic system does not exist separately from the environment that surrounds it creates the need for the functioning and development of the organization to take into account the goals of the main stakeholders. The object of this study is unified heat supply organizations, acting as one of the participants in heat supply, which is legally responsible for the modernization and technological development of heat supply in a certain territory. The interaction of unified heat supply organizations with other economic entities and holders of interests necessarily influences the nature and intensity of modernization and technological development, and their innovative development. The purpose of the study is to identify groups of stakeholders whose interaction is important for the innovative development of unified heat supply organizations, as well as to determine their main goals and interests in order to be able to take them into account when developing a mechanism for managing the innovative development of unified heat supply organizations.

Materials and methods. The theoretical and methodological basis of the study was the work of Russian and foreign researchers in the field of the concept of stakeholders and the stakeholder approach to management. The methods of empirical and theoretical research were used in the study.

Results. The study of the approaches of Russian and foreign authors to the classification of stakeholders allowed us to form a list of the main stakeholders, interaction with which is important for the innovative development of unified heat supply organizations, as well as to highlight their main goals and interests, which is of interest, since identification, structuring and building a map of possible stakeholders allow us to evaluate the options for the functioning and development of the object of study from the point of view of existing interest groups and their influence.

Conclusions. A systematic approach to the management of groups interested in the innovative development of unified heat supply organizations, based on the optimality criterion, should become an important factor in the development of a management mechanism for the process under consideration.

KEYWORDS: heat supply, unified heat supply organizations, innovations, innovative development, innovative development of unified heat supply organizations, stakeholder, stakeholder theory, stakeholder approach

FOR CITATION: Glazkova V.V. Stakeholder approach to the innovative development of unified heat supply organizations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1264-1275. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1264-1275 (rus.).

Corresponding authors: Valeria V. Glazkova, leram86@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Постулатом стейкхолдерского подхода в управлении становится мысль о том, что любой хозяйствующий субъект существует не обособленно для достижения исключительно своих целей, но и как важная часть мезо- и макросреды, т.е. как элемент системы, который находится во взаимосвязи и взаимодействии с другими элементами системы и ее средой. Инновационное развитие организаций, в том числе и рассматриваемых в настоящей статье единых теплоснабжающих организаций (далее — ЕТО¹), также не проходит изолированно от факторов инновационного макро- и микроклимата, что подразумевает, что цели их инновационного развития должны быть согласованы с целями основных, заинтересованных в инновационном развитии ЕТО, сторон. Взаимодействие ЕТО с другими хозяйствующими субъектами и стейкхолдерами в обязательном порядке оказывает влияние на характер и интенсивность их инновационного развития [1, 2].

Традиционно принято считать, что основные положения теории стейкхолдеров сформировались к 60-м гг. XX в. В 70-х гг. Рассел Акофф при изучении социальных систем расширил эти положения, но широкое распространение они получили в 80-х гг. XX в. после выхода работы профессора Э.Р. Фримена «Стратегический менеджмент: стейкхолдерский подход» [3, 4]. Вместе с тем исследователь В.Л. Тамбовцев [5] утверждает, что неявно сформулированные постулаты теории стейкхолдеров могли возникнуть

еще в 1930-х гг. в работах М. Додда², который противопоставляя свою точку зрения А. Берле³, считавшему, что основная забота корпорации заключается в размере прибыли акционеров, определял в качестве значимых задач хозяйствующего субъекта, помимо прибыли, также и заботу о безопасности сотрудников, потребителях путем выпуска качественной продукции, а также местных сообществах и их благосостоянии. Спустя почти 20 лет Г. Саймон⁴ в своих работах определил, что согласно модели «поощрение–вклад» «все потенциальные участники организации получают за вступление в нее некоторое поощрение в обмен на соответствующий вклад в функционирование организации» [5, 6] (например, выручка от продаж для руководителей и акционеров, осуществляющих управление организацией, заработная плата для работников, участвующих в производственном процессе, приобретаемые потребителями блага и услуги за оплату покупок и т.д.). Эти же идеи нашли свое отражение в поведенческой теории фирмы в 1960-х гг., которая представляла цели фирмы не только в виде единственно возможной цели, выраженной в максимизации прибыли, как это было заявлено позже в неоклассической экономической теории, а в системе целей, которые были получены в ходе дискуссии различных групп, относящихся тем или иным образом к фирме, имеющих различные интересы [5].

В 1960–1970-х гг. растет интерес к концепции легитимности фирмы (J.G. Maurer, S.P. Sethi⁵ и др.), согласно которой организация должна «оправдывать свое существование перед другими организациями

¹ Единая теплоснабжающая организация в системе теплоснабжения — это теплоснабжающая организация, которая определяется в схеме теплоснабжения федеральным органом исполнительной власти, уполномоченным Правительством Российской Федерации на реализацию государственной политики в сфере теплоснабжения, или органом местного самоуправления на основании критериев и в порядке, которые установлены правилами организации теплоснабжения, утвержденными Правительством Российской Федерации.

² Dodd E.M. For whom are corporate managers trustees? // Harvard Law Review. 1932. Issue 45. Pp. 1145–1163.

³ Berle A.A. For whom corporate managers are trustees: A note // Harvard Law Review. 1932. Issue 45. Pp. 1365–1372.

⁴ Simon H.A. Comments on the theory of organizations // American Political Science Review. 1952. Pp. 1130–1139.

⁵ Sethi S.P. Dimensions of corporate social performance — An analytical framework // California Management Review. 1975. Vol. 17 (3). Pp. 58–64.

или вышестоящими организациями»⁶. Такой подход подразумевает, что организация должна показать, как она учитывает интересы различных групп лиц, что она «ответственна» и «полезна», и в связи с этим получить дополнительные ресурсы для своего развития, например, со стороны государства или вышестоящей корпорации и т.д. Этот подход тесно переплетается с современной концепцией социальной ответственности бизнеса, в рамках которой организациям необходимо проявлять заботу и отчитываться о формах ее проявления по отношению к своим работникам, об окружающей среде, а также местных сообществах [5, 7, 8]. Дальнейшее развитие стейкхолдерского подхода нашло отражение в работах Т.М. Джонса, С.Л. Хилла, О. Уильямсона, Дж. Поста, Л. Престона и С. Сакса [9, 10] и других авторов, которых объединяет идея о том, что отношения со стейкхолдерами необходимо рассматривать как важную составляющую деятельности организации, которой

требуется управлять, и которая в конечном итоге приведет к росту эффективности организации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе рассматриваемой концепции лежит процесс взаимоотношения и учет интересов широкого круга лиц, который обозначают термином «стейкхолдер». В переводе на русский язык так чаще всего называют «заинтересованные стороны» или «вовлеченные стороны», в то время как в оригинальном английском языке стейкхолдерами могут определять как лиц, инвестирующих в бизнес, так и лиц, заинтересованных в успехе какого-либо мероприятия [11]. Это ключевое понятие теории стейкхолдеров, поэтому целесообразно рассмотреть основные подходы к его трактовке, встречающиеся в экономической литературе, и сгруппировать их следующим образом (рис. 1).

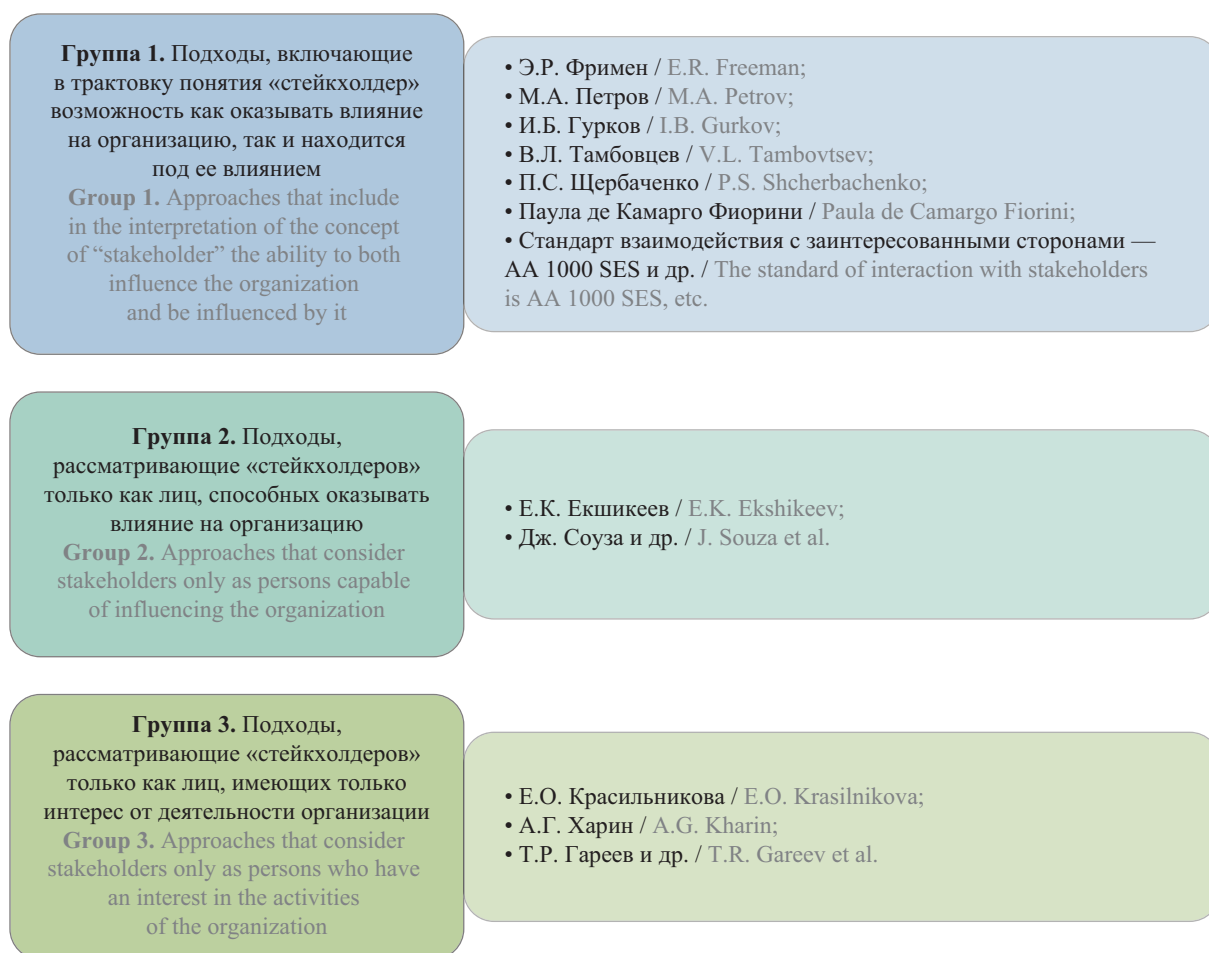


Рис. 1. Группировка подходов к определению термина «стейкхолдер» (составлена автором на основе работ А.П. Клемешева, Е.В. Кудряшовой, С.Э. Сорокина [3]; В.Л. Тамбовцева [5]; А.В. Плотноковой [11])

Fig. 1. Grouping of approaches to the definition of the term “stakeholder” (compiled by the author based on the works of A.P. Klemeshev, E.V. Kudryashova, S.E. Sorokina [3]; V.L. Tambovtseva [5]; A.V. Plotnikova [11])

⁶ Freeman R.E. Strategic management: A Stakeholder Approach. Boston, 1984. 275 p.

Табл. 1. Классификация стейкхолдеров (составлена автором на основе работ А.П. Клемешева, Е.В. Кудряшовой, С.Э. Сорокина [3]; А.В. Плотниковой [11]; А.И. Финогеевой [12])
Table 1. Classification of stakeholders (compiled by the author based on the works of A.P. Klemeshev, E.V. Kudryashova, S.E. Sorokina [3]; A.V. Plotnikova [11]; A.I. Finogeeva [12])

Обобщающий критерий Generalizing criterion	Авторы Authors	Классификация Classification
По месту в окружении компаний By location surrounded by the company	Р.Э. Фримен, О.Б. Зильберштейн, К.В. Невструев, Д.Д. Семенов, Т.Л. Шкляр, А.В. Юрковский, И. Беляева, М. Эскиндаров, Л. Никитина R.E. Freeman, O.B. Zilberstein, K.V. Nevstruev, D.D. Semenyuk, T.L. Shklyar, A.V. Yurkovsky, I. Belyaeva, M. Eskindarov, L. Nikitina	Делят стейкхолдеров на внутреннее и внешнее окружение Stakeholders are divided into the internal and external environment of the company
	Д. Харрисон и К. Джон D. Harrison and K. John	Разделяют стейкхолдеров на широкое, операционное и внутреннее окружение Stakeholders are divided into broad, operational and internal environments
	А.И. Финогеева A.I. Finogeeva	Выделяет 4 группы стейкхолдеров: • внутренние или внутригрупповые стратегические стейкхолдеры; • внешние стратегические и операционные стейкхолдеры; • внешние регулирующие и контролирующие стейкхолдеры; • прочие внешние стейкхолдеры Identifies 4 groups of stakeholders: • internal or intra-group strategic stakeholders; • external strategic and operational stakeholders; • external regulatory and controlling stakeholders; • other external stakeholders
Разделение стейкхолдеров по функциональному признаку Separation of stakeholders by functional feature	Г. Ньюболд, Г. Лиффман G. Newbold, G. Liffmann	Стейкхолдеры делятся на оказывающих финансовую помощь, управляющих, работников и экономических партнеров Stakeholders are divided into financial aid providers, managers, employees and economic partners
	И. Ансофф I. Ansoff	Стейкхолдеры делятся на менеджмент компании, сотрудников, собственников, продавцов и поставщиков Stakeholders are divided into company management, employees, owners, sellers and suppliers
	Г.Н. Константинов G.N. Konstantinov	Выделяет: стейкхолдеры финансового интереса, управленцы, сотрудники, интеллектуальный капитал, социальные группы заинтересованных сторон Highlights: stakeholders of financial interest, managers, employees, intellectual capital, social groups of stakeholders
	Б.А. Якубов B.A. Yakubov	Выделяет следующих стейкхолдеров: нормативные, функциональные, диффузные, потребители Identifies the following stakeholders: regulatory, functional, diffuse, consumers

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Обобщающий критерий Generalizing criterion	Авторы Authors	Классификация Classification
По степени заинтересованности и влияния By the degree of interest and influence	Дж. Саваж и Т. Никс J. Savage and T. Nicks	Рассматривают стейкхолдеров с позиций угрозы или сотрудничества, выделяя поддерживающих, смешанных, не поддерживающих и маргинальных Consider stakeholders from the standpoint of threat or cooperation, highlighting supportive, mixed, non-supportive and marginal
	Р. Митчелл, Р. Эйгл, Д. Вуд R. Mitchell, R. Eysgle, D. Wood	Идентифицируют стейкхолдеров по атрибутам отношений (власть, легитимность, актуальность) Identify stakeholders by relationship attributes (power, legitimacy, relevance)
	Е.Н. Скляр, К.В. Швыгова E.N. Sklyar, K.V. Shvygova	Выделяют: ведущие заинтересованные субъекты, уведомляемые и внешние There are: leading stakeholders, notifiable and external
	А.В. Плотнокова A.V. Plotnikova	Ключевые и неключевые стейкхолдеры, положительно и отрицательно влияющие на систему Key and non-key stakeholders that positively and negatively affect the system
	Р. Митчелл R. Mitchell	Ключевыми стейкхолдерами являются «категорическая группа», «опасная группа», «зависимая группа» и «доминирующая группа» The key stakeholders are the "categorical group", "dangerous group", "dependent group" and "dominant group"
	М. Родригес, Дж. Ричарт и П. Санчес M. Rodriguez, J. Richard and P. Sanchez	Выделяют субстанциональных стейкхолдеров (от них зависит существование организации), контрактных (партнеры) и контекстуальных (поддерживают функционирование организации) There are substantial stakeholders (the existence of the organization depends on them), contractual (partners) and contextual (support the functioning of the organization)

Проведенный анализ позволил заключить, что большинство из подходов к определению «стейкхолдеров» включает в трактовку данного понятия как возможность оказывать воздействие на экономическую систему (в частности, организацию), так и находиться под ее влиянием. В зависимости от области применения это воздействие может быть направлено на цели, результаты деятельности системы, стратегию, политику и процессы и др.

Исходя из интересов стейкхолдеров и степени их влияния на систему в экономической литературе образовался ряд классификаций и подходов к структуризации стейкхолдеров, основные из которых представлены в табл. 1. Столь обширное количество существующих классификаций стейкхолдеров систематизировано по трем основным признакам: месту в окружении компании, функциональному признаку, степени заинтересованности и влияния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стоит предположить, что развитие классификаций стейкхолдеров связано со спецификой и особенностями функционирования организаций [13, 14].

Вместе с тем нужно отметить, что, рассматривая процесс управления с точки зрения теории стейкхолдеров, всегда возникает необходимость создания классификации стейкхолдеров применительно к исследуемой системе, так как идентификация, структуризация и построение карты возможных стейкхолдеров позволяют оценить варианты ее развития с точки зрения существующих заинтересованных групп и степени их влияния. Это положение определяет потребность выделить следующие группы стейкхолдеров, взаимодействие с которыми важно для инновационного развития ЕТО, а также их основные цели и интересы (табл. 2) [15, 16]. Здесь же стоит заметить, что топливно-энергетический комплекс, в частности и система теплоснабжения, находится в условиях энергоперехода, т.е. значительного структурного изменения в энергетике, как мирового, так и российского масштаба, при котором приоритет отдается экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, не снижая при этом потребительских свойств услуг комплекса. Это положение также требует отражения в целях и интересах стейкхолдеров инновационного развития ЕТО.

Табл. 2. Характеристика взаимодействия ЕТО и ее основных стейкхолдеров в процессе инновационного развития ЕТО (составлено автором)

Table 2. Characteristics of the interaction of IT and its main stakeholders in the process of innovative development of IT (compiled by the author)

Стейкхолдер Stakeholder	Основные цели и интересы в процессе инновационного развития ЕТО The main goals and interests in the process of innovative development IT
Органы государственной власти State authorities	• обеспечение поступления платежей в бюджет в полном объеме в установленные сроки; • выполнение задач и достижение целевых параметров государственной энергетической политики; • модернизация существующих мощностей теплоснабжения; • развитие инфраструктуры территории; • повышение эффективности теплоснабжения; • развитие энергосбережения в стране; • выполнение плановых показателей по объемам и динамике снижения выбросов и сбросов загрязняющих веществ • ensuring the receipt of payments to the budget in full on time; • implementation of tasks and achievement of target parameters of the state energy policy; • modernization of existing heat supply capacities; • development of the territory's infrastructure; • improving the efficiency of heat supply; • development of energy saving in the country; • implementation of planned indicators on the volume and dynamics of reducing emissions and discharges of pollutants
Контрольные органы Control bodies	• соблюдение экологических норм и стандартов; • соблюдение стандартов и правил безопасности • compliance with environmental norms and standards; • compliance with safety standards and regulations
Акционеры	• повышение финансовых и производственных показателей; • повышение эффективности производства и снижение издержек; • повышение акционерной стоимости; • достаточность средств для функционирования и развития теплоснабжения за счет повышения эффективности его деятельности; • доход от инвестиций

Стейкхолдер Stakeholder	Основные цели и интересы в процессе инновационного развития ЕТО The main goals and interests in the process of innovative development IT
Shareholders	• improving financial and production indicators; • increase production efficiency and reduce costs; • increase in shareholder value; • sufficiency of funds for the functioning and development of heat supply by increasing the efficiency of its activities; • return on investment
Инвесторы Investors	• повышение финансовых и производственных показателей; • доход от инвестиций; • рабочий механизм принятия решений по инвестиционным вложениям в развитие отрасли, исходя в том числе из показателей улучшения экологической обстановки • improving financial and production indicators; • return on investment; • a working mechanism for making decisions on investment investments in the development of the industry, based, among other things, on indicators of environmental improvement
Потребители Consumers	• выполнение свойства энергетической безопасности теплоснабжения; • обеспечение требуемых параметров и качества теплоснабжения; • доступность и надежность теплоснабжения для всех категорий потребителей; • приемлемая цена услуг; • наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду • performance of the property of energy security of heat supply; • ensuring the required parameters and quality of heat supply; • availability and reliability of heat supply for all categories of consumers; • reasonable price of services; • the lowest level of negative impact on the environment
Будущие поколения Future generations	• наименьший уровень или отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и выполнение свойства экологической безопасности теплоснабжения; • рациональное использование ресурсов и соблюдение принципов энергоэффективности; • наличие прозрачного и рабочего механизма, позволяющего учитывать их интересы при принятии управленческого решения • the lowest level or absence of negative impact on the environment and the fulfillment of the environmental safety properties of heat supply; • rational use of resources and compliance with the principles of energy efficiency; • the presence of a transparent and working mechanism that allows taking into account their interests when making a management decision
Местные сообщества Local communities	• наименьший уровень или отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и выполнение свойства экологической безопасности теплоснабжения; • участие в устойчивом развитии территории; • участие в развитии местной инфраструктуры; • улучшение экологической обстановки • the lowest level or absence of negative impact on the environment and the fulfillment of the environmental safety properties of heat supply; • participation in the sustainable development of the territory; • participation in the development of local infrastructure; • improving the environmental situation
Общественные организации и экологические движения Public organizations and environmental movements	• наименьший уровень или отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и выполнение свойства экологической безопасности теплоснабжения; • соблюдение экологических норм и стандартов; • соблюдение принципа экологической прозрачности • the lowest level or absence of negative impact on the environment and the fulfillment of the environmental safety properties of heat supply; • compliance with environmental norms and standards; • compliance with the principle of environmental transparency

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Стейкхолдер Stakeholder	Основные цели и интересы в процессе инновационного развития ЕТО The main goals and interests in the process of innovative development IT
Сотрудники организации Employees of the organization	• соблюдение экологических норм и стандартов; • соблюдение стандартов и правил безопасности; • создание рабочих мест; • улучшение условий труда; • возможность профессионального роста и развития; • достойная заработная плата; • возможность повышения образовательного уровня • compliance with environmental norms and standards; • compliance with safety standards and regulations; • job creation; • improving working conditions; • opportunity for professional growth and development; • decent wages; • the possibility of improving the educational level
Поставщики ресурсов Resource Providers	• прибыль; • возможность стабильного долгосрочного партнерства; • соблюдение экологических, технических и прочих нормативов и стандартов при отборе поставщиков • profit; • the possibility of stable long-term partnership; • compliance with environmental, technical and other regulations and standards in the selection of suppliers
Теплоснабжающие организации Heat supply organizations	• экономически выгодное взаимодействие с учетом интеграции заботы об окружающей среде, следствием чего становится применение ресурсосберегающих способов хозяйствования, инновационных технологий и продуктов • cost-effective interaction taking into account the integration of environmental care, which results in the use of resource-saving management methods, innovative technologies and products
Строительно-монтажные организации Construction and installation organizations	• прибыль; • возможность стабильного долгосрочного партнерства • profit; • the possibility of a stable long-term partnership
Проектные организации Project organizations	• прибыль; • возможность стабильного долгосрочного партнерства • profit; • the possibility of a stable long-term partnership
Научно-исследовательские организации Research organizations	• спрос на прикладные научные исследования; • финансирование научного поиска развития чистой энергетики и возобновляемых ресурсов; • развитие прикладных научных исследований • demand for applied scientific research; • financing the scientific search for the development of clean energy and renewable resources; • development of applied scientific research
Образовательные организации Educational organizations	• развитие системы дополнительного профессионального образования; • развитие прикладных научных исследований • development of the system of additional professional education; • development of applied scientific research

Как отмечает исследователь В.Л. Тамбовцев, стейкхолдерский подход в управлении включает три направления: описание поведения системы в рамках реализации этой концепции, принятие управленческих решений, касающихся расширения круга це-

лей системы, а также исследование и применение на практике инструментов, позволяющих реализовывать установленные цели системы во взаимодействии с внешней средой. Учитывая это обстоятельство, автор заключает, что «стейкхолдерская теория

является менеджерской в широком смысле этого слова», так как, помимо исследования причинно-следственных связей, предлагает разрабатывать структуры управления, управленческие механизмы и инструменты, возможные к применению по отношению к системе с позиций учета интересов заинтересованных сторон [5]. В этом аспекте стейкхолдерский подход в управлении вызывает особый интерес, так как помогает решать вопросы обоснования, лежащего внутри экономической теории, и выбора нормативных установок развития экономической

системы. В этой связи рассмотрим развитие теории стейкхолдеров и ее применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимость рассмотрения содержания стейкхолдерского подхода с позиций нескольких авторов вызвана тем, что, несмотря на общие категории и подходы, применяемые к рассматриваемой теории, содержание их бывает разным, отсюда методологически важным является необходимость их уточнения (рис. 2).



Рис. 2. Подходы к теории стейкхолдеров (составлено автором на основе работ А.П. Клемешева, Е.В. Кудряшовой, С.Э. Сорокина [3]; А.В. Плотниковой [11])

Fig. 2. Approaches to the theory of stakeholders (compiled by the author on the basis of the works of A.P. Klemeshev, E.V. Kudryashova, S.E. Sorokina [3]; A.V. Plotnikova [11])

До недавнего времени концепция стейкхолдерского подхода в управлении содержала в себе фундаментальное противоречие, когда считалось, что невозможно одинаково добиваться высоких экономических целей бизнеса и также хорошо заботиться об интересах общества и работников. Однако М. Портер и М. Креймер в своих работах попытались минимизировать данное противоречие, представив комплекс практических инструментов управления, применение которых одновременно приводит, с одной стороны, к повышению конкурентоспособности организации и росту ее прибыли и, с другой стороны, улучшению социальных и экономических условий работников организации и местных сообществ [17, 18]. Рассел Акофф также отмечал, что, несмотря на то, что каждый стейкхолдер имеет свою конечную цель, зачастую стейкхолдеры в рамках одной экономической системы могут занимать конкурентные позиции, а иногда цель одного стейкхолдера даже может противоречить цели другого, все же решения многих социальных проблем можно добиться, наладив эффективное взаимодействие «заинтересованных лиц» в системе [19, 20].

В продолжение мысли Рассела Акоффа следует добавить, что эффективное взаимодействие стейкхолдеров целесообразно осуществлять, опираясь на критерий оптимальности В. Парето [21]: чтобы интересы ни одного из стейкхолдеров экономической системы не были ущемлены, необходимо организовать такое состояние системы, когда никакие возможные изменения не могут улучшить благосостояние хотя бы одного индивида, не ухудшая при этом эко-

номическое положение остальных. Другими словами, управление интересами стейкхолдеров тогда можно считать эффективным, когда улучшение положения отдельных стейкхолдеров в системе не приводит к ухудшению положения остальных заинтересованных сторон [20]. Данный принцип справедлив и для управления группой стейкхолдеров, заинтересованных в инновационном развитии ЕТО, перечень и цели которых приведены в табл. 2.

В заключение следует отметить, что основные положения теории стейкхолдеров нашли разнообразное применение в управлении: И.Ю. Беляевой, В.А. Маковкиной, И.А. Семейкиной, И.Н. Ткаченко с позиций управления стейкхолдерами рассматривалось корпоративное управление; Г. Кассингс, Н. Вафзас, Л.А. Раменская, Л. Престон и Х. Сапиенс, С.Ф. Вилло и другие предлагают использовать подход с позиций риск-менеджмента; И.Н. Ткаченко и К.К. Сивокос применяют стейкхолдерскую концепцию в управлении проектами и т.д. Несмотря на многообразие форм использования данной теории, для каждого исследуемого объекта целесообразно выработать системный подход к управлению всеми заинтересованными группами, что станет важной составляющей для его устойчивого развития. В этой связи в дальнейших исследованиях при разработке механизма управления инновационным развитием ЕТО целесообразно учитывать интересы и цели основных стейкхолдеров рассматриваемого объекта в контексте предмета исследования, основываясь на критерии оптимальности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Евсеев Е.Г. Ресурсно-сбалансированное управление функционированием и развитием теплоснабжающих организаций : дис. ... д-ра экономических наук. М., 2022. 388 с.
2. Stennikov V., Penkovskii A. Problems of Russian heat supply and ways of their solution // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 219. P. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202021902003
3. Klemeshev A.P., Kudryashova E.V., Sorokin S.E. Stakeholder approach to the implementation of the “third mission” of universities // Baltic Region. 2019. Vol. 11. Issue 4. Pp. 114–135. DOI: 10.5922/2079-8555-2019-4-7
4. Харин А.Г., Гареев Т.Р. Стейкхолдерский подход в управлении организациями: перспективы применения теоретико-игровых моделей // Terra Economicus. 2014. Т. 12. № 4. С. 105–113.
5. Тамбовцев В.Л. Стейкхолдерская теория фирмы в свете концепции режимов собственности // Российский журнал менеджмента. 2008. Т. 6. № 3. С. 3–26.
6. Valentinov V., Hajdu A. Integrating instrumental and normative stakeholder theories: a systems theory approach // Journal of Organizational Change Management. 2021. Vol. 34. Issue 4. Pp. 699–712. DOI: 10.1108/JOCM-07-2019-0219
7. Kim E.W., Choe S., Kwak J. Multinational companies and the corporate social responsibility at home: the stakeholder approach // Management Decision. 2019. Vol. 57. Issue 9. Pp. 2383–2400. DOI: 10.1108/MD-01-2018-0109
8. Khojastehpour M., Shams S.M.R. Addressing the complexity of stakeholder management in international ecological setting: A CSR approach // Journal of Business Research. 2019. Vol. 96. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.05.012
9. Donaldson T., Preston L.E. The stakeholder theory of the corporation: concepts, evidence, and implications // Academy of Management Review. 1995. Vol. 20. Issue 1. Pp. 65–91. DOI: 10.5465/amr.1995.9503271992

10. Post J.E., Preston L.E., Sachs S. Managing the extended enterprise: the new stakeholder view // *California Management Review*. 2002. Vol. 45. Issue 1. Pp. 6–28. DOI: 10.2307/41166151

11. Плотников А.В. Сравнение содержания стейкхолдерских подходов в управлении // *Экономика, предпринимательство и право*. 2021. Т. 11. № 12. С. 2695–2704. DOI: 10.18334/epp.11.12.113929

12. Финогеева А.И. Формирование механизма управления ключевыми стейкхолдерами корпорации : дис. ... канд. экон. наук. М., 2019. 208 с.

13. Degtyareva V.V., Bakhtina S.S., Tatenko G.I. Stakeholder engagement in the management of innovative territorial development: A platform approach // “Smart Technologies” for Society, State and Economy. 2021. Pp. 1563–1572. DOI: 10.1007/978-3-030-59126-7_171

14. Tyapkina M., Vinokurov S., Vinokurova M., Li H. Development of agroindustrial companies: the stakeholder approach // *Regional Economic Development in Russia*. 2020. Pp. 101–112. DOI: 10.1007/978-3-030-39859-0_9

15. Astratova G.V., Rutkauskas T.K., Rutkauskas K.V., Klimuk V.V. Creating an environmentally safe and reliable heat supply system through the introduction of energy-saving technologies in housing and common utili-

ties services // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 265. P. 04020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126504020

16. Verstina N., Evseev E., Tsvetkova O., Kulachinskaya A. The technical state of engineering systems as an important factor of heat supply organizations management in modern conditions // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 3. P. 1015. DOI: 10.3390/en15031015

17. Porter M.E., Kramer M.R. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility // *Harvard Business Review*. 2006. DOI: 10.1108/sd.2007.05623ead.006

18. Porter M.E., Hills G., Pitzer M., Patscheke S., Hawkins E. Measuring shared value: How to unlock value by linking social and business results // *FSG*. 2011.

19. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах / пер. с англ. Г.Б. Рубальского. М. : ЛКИ, 2008. 272 с.

20. Глазкова В.В. Методические основы оценки эффективности социальных инновационно-инвестиционных проектов : дис. ... канд. экон. наук. Владимир, 2015. 227 с.

21. Парето В. Компендиум по общей социологии / пер. с итал. А.А. Зотова. М. : ГУ ВШЭ, 2007. 511 с.

Поступила в редакцию 1 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 12 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 19 сентября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Валерия Викторовна Глазкова — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, РИНЦ ID: 888163, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

REFERENCES

1. Evseev E.G. *Resource-balanced management of the functioning and development of heat supply organizations : dis. ... doctors of economic sciences*. Moscow, 2022; 388. (rus.).

2. Stennikov V., Penkovskii A. Problems of Russian heat supply and ways of their solution. *E3S Web of Conferences*. 2020; 219:02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202021902003

3. Klemeshev A.P., Kudryashova E.V., Sorokin S.E. Stakeholder approach to the implementation of the “third mission” of universities. *Baltic Region*. 2019; 11(4):114-135. DOI: 10.5922/2079-8555-2019-4-7

4. Kharin A.G., Gareev T.R. Stakeholder approach in the management of organizations: prospects for the use of game-theoretic models. *Terra Economicus*. 2014; 12(4):105-113. (rus.).

5. Tambovtsev V.L. Stakeholder theory of the firm in the light of the concept of ownership regimes. *Russian Journal of Management*. 2008; 6(3):3-26. (rus.).

6. Valentinov V., Hajdu A. Integrating instrumental and normative stakeholder theories: a systems theory

approach. *Journal of Organizational Change Management*. 2021; 34(4):699-712. DOI: 10.1108/JOCM-07-2019-0219

7. Kim E.W., Choe S., Kwak J. Multinational companies and the corporate social responsibility at home: the stakeholder approach. *Management Decision*. 2019; 57(9):2383-2400. DOI: 10.1108/MD-01-2018-0109

8. Khojastehpour M., Shams S.M.R. Addressing the complexity of stakeholder management in international ecological setting: A CSR approach. *Journal of Business Research*. 2019; 96. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.05.012

9. Donaldson T., Preston L.E. The stakeholder theory of the corporation: concepts, evidence, and implications. *Academy of Management Review*. 1995; 20(1):65-91. DOI: 10.5465/amr.1995.9503271992

10. Post J.E., Preston L.E., Sachs S. Managing the extended enterprise: The new stakeholder view. *California Management Review*. 2002; 45(1):6-28. DOI: 10.2307/41166151

11. Plotnikov A.V. Comparison of stakeholder approaches in management. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2021; 11(12):2695-2704. DOI: 10.18334/epp.11.12.113929 (rus.).
12. Finogeeva A.I. *Formation of a management mechanism for key stakeholders of the corporation : dis. ... candidate of Economic Sciences*. Moscow, 2019; 208. (rus.).
13. Degtyareva V.V., Bakhtina S.S., Tatenko G.I. Stakeholder engagement in the management of innovative territorial development: A platform approach. “*Smart Technologies*” for Society, State and Economy. 2021; 1563-1572. DOI: 10.1007/978-3-030-59126-7_171
14. Tyapkina M., Vinokurov S., Vinokurova M., Li H. Development of agroindustrial companies: the stakeholder approach. *Regional Economic Development in Russia*. 2020; 101-112. DOI: 10.1007/978-3-030-39859-0_9
15. Astratova G.V., Rutkauskas T.K., Rutkauskas K.V., Klimuk V.V. Creating an environmentally safe and reliable heat supply system through the introduction of energy-saving technologies in housing and common utilities services. *E3S Web of Conferences*. 2021; 265:04020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126504020
16. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O., Kulachinskaya A. The technical state of engineering systems as an important factor of heat supply organizations management in modern conditions. *Energies*. 2022; 15(3):1015. DOI: 10.3390/en15031015
17. Porter M.E., Kramer M.R. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*. 2006. DOI: 10.1108/sd.2007.05623ead.006
18. Porter M.E., Hills G., Pitzer M., Patscheke S., Hawkins E. Measuring shared value: How to unlock value by linking social and business results. *FSG*. 2011.
19. Akoff R. *On purposeful systems*. Moscow, LKI, 2008; 272. (rus.).
20. Glazkova V.V. *Methodological foundations for evaluating the effectiveness of social innovation and investment projects : dis. ... candidate of Economic Sciences*. Vladimir, 2015; 227. (rus.).
21. Pareto V. *Compendium on general sociology*. Moscow, Publishing House of the Higher School of Economics, 2007; 511. (rus.).

Received September 1, 2022.

Adopted in revised form on September 12, 2022.

Approved for publication on September 19, 2022.

B I O N O T E S : **Valeria V. Glazkova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 888163, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

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 Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению 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:

Артемова 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.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

И з в е щ е н и е	
Кассир	Форма № ПД-4 УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 (ИНН получателя платежа) 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 (номер счета получателя платежа) в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2022 г. (наименование платежа) Вестник МГСУ (номер лицевого счета (код) плательщика) Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____
Квитанция	Форма № ПД-4 УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 (ИНН получателя платежа) 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 (номер счета получателя платежа) в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2022 г. (наименование платежа) Вестник МГСУ (номер лицевого счета (код) плательщика) Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

Форма № ПД-4

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

