

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 3
2024**

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

Сквозной номер 184

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 3
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.03.2024.
Подписан в свет	29.03.2024.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,32. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 86

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «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, проф., зав. каф. металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.03.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Фам Тхи Хонг Тхам, Зыонг Де Тай, А.К. Соловьев

Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима 349

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

А.В. Захаров

Постановка задач прохождения звука через границы трехмерных сред и через пластины 358

В.С. Широков, Т.А. Белаиш, Т.Е. Гордеева

Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий 367

М.Н. Кирсанов

Формулы для двухсторонней оценки основной частоты колебаний решетчатой фермы 377

М.А. Дежин, А.М. Ибрагимов

Разработка конструктивного решения сопряжений колонн и ригелей из древесины на металлических накладках и шурупах 387

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Д.Ю. Желдаков, В.Т. Ерофеев

Определение долговечности строительной керамики 394

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Е.Э. Смирнова, М.Ю. Слесарев

Экологизация негативных факторов деятельности предприятий и организаций 403

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.В. Бояринцев, Е.К. Козликин, С.А. Козельских

Экспериментальное определение параметров методики исследования прочности смерзания грунта и материала фундамента 415

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.А.А. Ахмед, Е.С. Гогина, Н.А. Макиша

Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы 426

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Джамал Юнис Омран, Мустафа Али Вассуф

Using Building Information Modelling (BIM) by studying building orientation during design to achieve more sustainable buildings (Использование информационного моделирования строительных объектов (BIM) с целью изучения ориентации здания при проектировании для достижения их большей устойчивости) . . . 436

В.Н. Азаров, О.В. Бурлаченко, А.О. Бурлаченко, М.Д. Азарова

Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха 456

С.И. Евтушенко, Р.В. Осташев

Определение веса элемента с целью приоритизации исправления коллизий пересечения 469

Требования к оформлению научной статьи 478

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Pham Thi Hong Tham, De Tai Duong, Aleksey K. Solovyev

Method of calculation of geometrical parameters of building atrium structures considering the comfort of temperature and air regime. 349

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

Arkady V. Zakharov

The formulation of sound transmission problems through the boundaries of three-dimensional media and through plates 358

Viacheslav S. Shirokov, Tatyana A. Belash, Tatyana E. Gordeeva

Analytical method for determining the stress-strain state of modular buildings 367

Mikhail N. Kirsanov

Formula for two-sided estimation of the fundamental frequency of oscillations of a lattice truss 377

Maxim A. Dezhin, Aleksandr M. Ibragimov

Development of a constructive solution of wood columns and crossbars interfaces on metal overlays and screws 387

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Dmitriy Yu. Zheldakov, Vladimir T. Erofeev

Determination of durability of building ceramics 394

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Yelena E. Smirnova, Mikhail Yu. Slesarev

Greening negative factors in the activities of enterprises and organizations. 403

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Andrey V. Boyarintsev, Evgeniy K. Kozlikin, Sergei A. Kozelskikh

Experimental determination of the parameters of the methodology for investigating the frost strength bond of soil and foundation material. 415

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Ahmed Sameh, Elena S. Gogina, Nikolay A. Makisha

Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches 426

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Jamal Younes Omran, Moustafa Ali Wassouf

Using Building Information Modelling (BIM) by studying building orientation during design to achieve more sustainable buildings 436

Valerii N. Azarov, Oleg V. Burlachenko, Alexander O. Burlachenko, Maria D. Azarova

Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution. 456

Sergey I. Evtushenko, Roman V. Ostashev

Determination of element weight for the purpose of prioritization of intersection collision correction 469

Requirements for research paper design 478

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721:628.89

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357

Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима

Фам Тхи Хонг Тхам^{1,2,3}, Зьонг Де Тай⁴, Алексей Кириллович Соловьев³

¹ Технологический университет Хошимина; г. Хошимин, Вьетнам;

² Вьетнамский национальный университет Хошимина; г. Хошимин, Вьетнам;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

⁴ Университет Тран Дай Нгиа; г. Хошимин, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние атриума на температурную стратификацию при естественной вентиляции внутри помещений учебно-лабораторного корпуса Московского государственного строительного университета (МГСУ) с помощью натуральных экспериментов. Целью исследования является разработка нового метода расчета геометрических параметров атриума здания с учетом комфорта его температурно-воздушного режима с применением решения разработанных базовых уравнений воздушного потока в сочетании с методами математического моделирования. Получена формула для определения расхода воздуха при естественном охлаждении в атриумах, анализа и проектирования системы естественной вентиляции в здании с атриумом с более чем двумя вытяжными отверстиями. На основании полученных результатов сделан вывод об оптимальной площади вытяжных и приточных проемов в здании атриума при различной его высоте. Эти данные могут иметь практическое применение при проектировании зданий с атриумами.

Материалы и методы. Использованы методы полумпирического исследования, методы простой линейной регрессии для установления корреляции между измеряемыми переменными температурой воздуха и высотой здания в атриуме с конкретными условиями, позволяющими определять температуру на любой высоте.

Результаты. Разработана формула расчета площади вытяжных и приточных отверстий в связи с высотой атриума, установлено их влияние на тепловые характеристики конструкций зданий с атриумами.

Выводы. Результаты исследования позволяют быстро и точно определить геометрические параметры для обеспечения снижения температуры воздуха в зданиях с атриумами. Это играет важную роль на начальном этапе проектирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геометрические параметры, температурная стратификация, высота атриума, тепловые характеристики, конструкции атриума, эффект дымовой трубы, тепловой комфорт, естественная вентиляция, эффективность охлаждения, расход воздуха

Благодарности. Авторы выражают благодарность Национальному исследовательскому Московскому государственному строительному университету за оказание поддержки и предоставление необходимых ресурсов и времени для проведения исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тхам Ф.Т.Х., Зьонг Де Тай, Соловьев А.К. Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 349–357. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357

Автор, ответственный за переписку: Фам Тхи Хонг Тхам, ptham@gmail.com.

Method of calculation of geometrical parameters of building atrium structures considering the comfort of temperature and air regime

Pham Thi Hong Tham^{1,2,3}, De Tai Duong⁴, Aleksey K. Solovyev³

¹ Vietnam National University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT); Ho Chi Minh, Vietnam;

² Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM); Ho Chi Minh, Vietnam;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

⁴ Tran Dai Nghia University (TDNU); Ho Chi Minh, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. The influence of atrium on temperature stratification under indoor natural ventilation of the teaching-laboratory building of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) with the help of full-scale experiments is considered.

Based on this, the aim of the research is to develop a new method of calculating the optimal geometric parameters of a building atrium considering the comfort of its temperature-air regime by solving the developed basic airflow equations in combination with mathematical modelling methods. The formula for determining the air flow rate for natural ventilation in atriums, analyzing and designing a natural ventilation system in a building with an atrium with more than two ventilation outlets was derived. Based on the results obtained, a conclusion is made about the optimal area of exhaust and supply openings in an atrium building at different heights. These data may have practical application in the design of buildings with atriums.

Materials and methods. Semi-empirical research methods were used. Simple linear regression methods were carried out to establish a correlation between the measured variables air temperature and building construction height in an atrium with specific conditions to determine the temperature at any height.

Results. The formula for calculating the optimal area of inlet and outlet openings in connection with the atrium height and their influence on the thermal characteristics of the structures of buildings with atriums was developed.

Conclusions. The results of the research make it possible to quickly and accurately determine the geometric parameters to ensure the reduction of air temperature in buildings with atriums. This plays an important role in the initial design phase.

KEYWORDS: geometrical parameters, temperature stratification, atrium height, thermal characteristics, atrium structures, stack effect, thermal comfort, natural ventilation, cooling efficiency, air flow rate

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) for providing support and providing the necessary resources and time to conduct the research.

FOR CITATION: Pham H.T.T., Duong De Tai, Solovyyev A.K. Method of calculation of geometrical parameters of building atrium structures considering the comfort of temperature and air regime. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):349-357. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357 (rus.).

Corresponding author: Pham Thi Hong Tham, ptham0825@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство атриумов с каждым годом становится все более популярным. Атриумы являются стандартной особенностью архитектуры торгово-развлекательных центров и коммерческих зданий [1].

Основным преимуществом использования естественной вентиляции служит ее способность снижать энергопотребление и затраты, создавая при этом здоровую и комфортную среду за счет поступления свежего воздуха в здание [2].

На сегодняшний день проведен ряд исследований, посвященных поиску оптимальной геометрии параметров атриума для различных условий [3–5]. Расположение и размер вытяжных отверстий также влияют на распределение температуры в пространстве атриума, что может смягчить эффект тепловой стратификации в жарком климате, тем самым снижая нагрузку на энергопотребление [6, 7]. Данные результаты практически применяются при проектировании естественно вентилируемых атриумов.

Наряду с формой атриума, размерами и расположением вентиляционных отверстий имеет значение высота здания [8–10]. Было выявлено, что с увеличением размера атриума в рассматриваемом многоэтажном жилом здании повышалась и улучшалась производительность и эффективность работы естественной вентиляции. Но, когда размер атриума достигал определенной величины, эффективность работы вентиляции переставала изменяться [11–13]. В помещениях на нижнем уровне вентиляция улучшалась за счет эффекта тяги, в помещениях на более высоких уровнях наблюдалось отсутствие данного эффекта или его слабое влияние [14]. Помимо прочих геометрических параметров атриума, важное значение для обеспечения теплового комфорта имеют форма его крыши и то, насколько она выше кровли здания; наличие или от-

сутствие на ней остекления, а также остекление вертикальных конструкций атриума [15, 16]. Теплопоступления через остекленные стены и крышу могут оказывать существенное влияние на модель распределения воздушных потоков и температурных полей в атриумном пространстве. Солнечная радиация играет основную роль в создании градиента температур в атриумах, главным образом влияя на температуру крыши [17, 18]. Также крыша атриума удерживает нагретый воздух перед тем, как он будет выброшен наружу, что может сказываться негативно на тепловом комфорте не только атриумного пространства, но и прилегающих помещений [19]. Хотя целью многих исследований была попытка разработать единый подход, применимый к любому атриумному зданию, до сих пор недостаточно информации о том, как различные параметры объемно-планировочного и конструктивного решения проектирования атриума влияют на тепловое состояние и параметры микроклимата в конкретных случаях [20].

Следовательно, необходимо проведение всестороннего исследования геометрических параметров зданий с атриумами в различных климатических условиях с целью облегчения поиска приемов применения естественной вентиляции для широкого спектра зданий и повышения их энергоэффективности. Практическое применение результатов целесообразно на начальном этапе проектирования, чтобы помочь архитектору и инженеру (проектировщику) принимать обоснованные проектные решения с оптимальным количеством приточных и вытяжных проемов и их размеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Построение модели расчета тепловых параметров атриумного здания с использованием полумпирического метода

В основе метода лежат следующие предположения:

- при стабильных условиях, учитывая, что воздух в здании несжимаемый из-за его малой скорости, потоки на входе и выходе из здания сохраняются;
- энергия, получаемая от конвективных теплообменников, теплопроводности через стены и излучения от стеклянной крыши здания, сохраняется и стабильна;
- основываясь на результатах эксперимента в работе [21], предполагается, что температура линейно распределяется по высоте. Поступающий воздух рассеивается и заполняет все здание, прежде чем покинуть его. Это означает, что параметры температуры и давления в вертикальном поперечном сечении Oz одинаковы, когда поток воздуха достигает установившегося состояния.

Закон сохранения массового расхода

Рассматривается воздушный поток в контрольном объеме, как показано на рис. 1. По закону сохранения массового расхода имеется уравнение:

$$\rho_o C_{d1} A_1 v_1 - \rho_i C_{d2} A_2 v_2 - \rho_i C_{d3} A_3 v_3 = 0, \quad (1)$$

где ρ — плотность газа, кг/м^3 ; C_d — коэффициент диссипации скорости при прохождении через тонкие стенки; A — площадь открытия, м^2 ; v — скорость воздуха в потоке, м/с ; индексы 1, 2, 3 представляют вход и выходы соответственно; индексы o и i означают параметры воздуха внутри и снаружи здания.

Предполагается, что распределение температурного поля по высоте подчиняется линейному закону. Температура изменяется вверх за счет излучения извне, как показано на рис. 2. Вертикальный

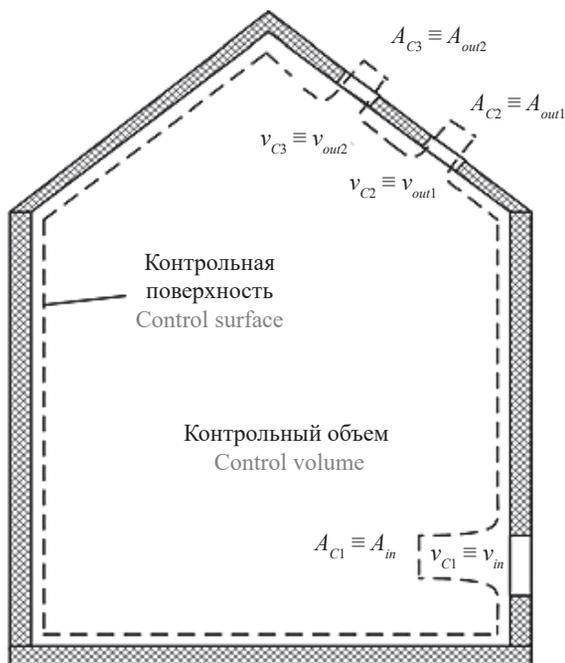


Рис. 1. Контрольный объем и контрольная поверхность
Fig. 1. Control volume and control surface

профиль температуры внутри помещения представлен следующим образом:

$$T_i = T_b + \gamma H_i, \quad (2)$$

где T_i — температура на высоте H_i , $^{\circ}\text{C}$; T_b — температура пограничного слоя на полу; γ — изменяющийся линейный коэффициент; H_i — высота между двумя вертикальными отверстиями, м.

Высота нижнего отверстия принимается за базовый уровень, а начало координат выбирается в центре входного отверстия. Давление воздуха внутри и снаружи помещения на любой высоте можно записать по выражению:

$$p_i(h) = p_{i0} - \int_0^h \rho_i g dh; \quad (3)$$

$$p_o(h) = p_{o0} - \int_0^h \rho_o g dh.$$

Разность давлений между наружным и внутренним воздухом на любой высоте представлена формулой:

$$\Delta p(h) = -\int_0^h (\rho_o - \rho_i) g dh - (p_{i0} - p_{o0}). \quad (4)$$

Видно, что $\Delta p = p_i - p_o$ — это разница давлений внутри и снаружи здания на любой высоте h . За счет этой разницы создается вентиляция снаружи внутрь, поскольку $\rho_o - \rho_i / \rho_i \approx T_i - T_o / T_o$ и температура изменяется линейно $T(h) = T_b + \gamma h$. Подставляя $T(h)$ в уравнение (4), получаем:

$$\Delta p(h) = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} \int_0^h (T_b - T_o + \gamma h) dh = \quad (5)$$

$$= -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} [(T_b - T_o)h + 0,5 \gamma h^2].$$

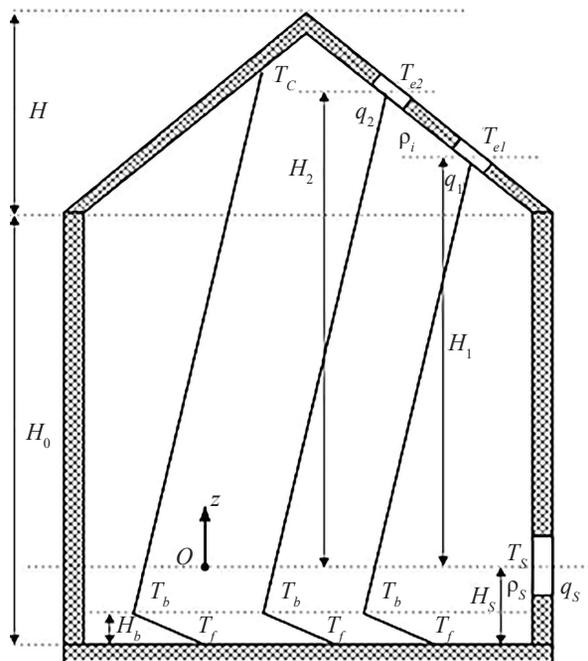


Рис. 2. Изменение температуры пола за счет излучения
Fig. 2. Change in floor temperature due to radiation

Формула (5) представлена разностью давлений на любой высоте снаружи и внутри здания. Из приведенных выше результатов следует, что на входе:

$$h = 0 \rightarrow \Delta p(0) = -\Delta p_0 < 0.$$

Воздух нагнетается в здание благодаря естественной вентиляции.

На высоте отверстия в расстоянии H_1 и H_2 разницы давления равна:

$$\Delta p_1 = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_0} [(T_b - T_0)H_1 + 0,5\gamma H_1^2];$$

$$\Delta p_2 = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_0} [(T_b - T_0)H_2 + 0,5\gamma H_2^2].$$

Применив уравнение Бернулли к потоку воздуха в любом отверстии, получим:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_i + \rho_i \frac{v_i^2}{2} \rightarrow v_i = \\ &= \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_i}} \Rightarrow q = C_d A v = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_i}}. \end{aligned}$$

В итоге расход воздуха на входе и выходе составляет:

$$q = C_{d0} A_0 \Delta p_0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= C_{d1} A_1 \Delta p_1 = \\ &= C_{d1} A_1 \sqrt{\frac{2[\Delta p_0 + \rho g \beta [(T_b - T_0)H_1 + 0,5\gamma H_1^2]]}{\rho}}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_2 &= C_{d2} A_2 \Delta p_2 = \\ &= C_{d2} A_2 \times \\ &\times \sqrt{\frac{2[\Delta p_0 + \rho g \beta [(T_b - T_0)H_2 + 0,5\gamma H_2^2]]}{\rho}}. \quad (8) \end{aligned}$$

Закон сохранения энергии

Сохранение энергии выражает первый закон термодинамики. Для контрольного объема скорость изменения запасенной энергии (кинетической, потенциальной и внутренней) внутри контрольного объема плюс отток запасенной энергии через контрольную поверхность равно скорости обмена теплом и работой (например, чистое поступление тепла и обмен мощностью). Было сделано несколько предположений:

- приточный воздух распределяется по всей площади помещения без потерь;
- температура поверхности потолка равна температуре воздуха у потолка и температуре вытяжного воздуха;
- уравнения излучения линеаризованы из-за умеренной разницы температур.

Система уравнений для сохранения энергии:

$$E = E_1 + E_2, \quad (9)$$

где E — тепловая энергия, полученная от источника тепла в помещении и от солнечного излучения; $E_1 = \rho c_p q_1 (T_{e1} - T_0)$ и $E_2 = \rho c_p q_2 (T_{e2} - T_0)$; T_{e1}, T_{e2} — температура в вытяжном отверстии; ρ — воздух внутри здания (предполагается несжимаемым), плотность воздушного потока; c_p — удельная теплоемкость воздуха; q_1, q_2 — расход воздуха в вытяжном отверстии.

Это уравнение энергии означает, что за счет энергии, которую воздух получает от источника тепла с приходом в здание, температура повышается.

Предположив, что распределение температуры линейно, мы имеем:

$$T_{e1} = T_b + \gamma H_1; T_{e2} = T_b + \gamma H_2. \quad (10)$$

Кроме того, существует также лучистая энергия, поглощаемая полом от крыши, которая передается вниз. Эта энергия выражается следующим уравнением:

$$E_3 = \alpha_f A (T_f - T_b), \quad (11)$$

где α_f — коэффициент конвективной теплоотдачи на полу; A — площадь пола здания; T_f — температура поверхности пола; T_b — температура пограничного слоя.

Энергия E_3 вычисляется следующим способом: энергия излучения от стеклянной крыши передается на пол для его нагрева. Рассмотрим крайне малую площадь dA на стеклянной крыше, которую поглощает стекло, энергия ее излучения составляет:

$$dE_3 = \alpha_r dA (T_c - T_f); \quad (12)$$

$$E_3 = \int_S dE_3 = \frac{2\alpha_r LH}{\sin \alpha} \left[T_b + \gamma H_o + \gamma \frac{H}{3} \right], \quad (13)$$

где α — угол наклона крыши; L — ширина крыши; H — высота крыши.

Кроме того, происходит обмен энергией между воздухом, поступающим в помещение, и полом. Воздух нагревается за счет конвекции у поверхности пола. Обмен энергией описывается уравнением:

$$\rho c_p q (T_b - T_0) = \alpha_f A (T_f - T_b), \quad (14)$$

где $q = q_1 + q_2$ — расход воздуха на входе.

Таким образом, имеем три энергетических уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} E &= \rho c_p q_1 (T_b + \gamma H_1 - T_0) + \\ &+ \rho c_p q_2 (T_b + \gamma H_2 - T_0); \quad (15) \end{aligned}$$

$$\frac{2\alpha_r LH}{\sin \alpha} \left(T_b + \gamma H_o + \gamma \frac{H}{3} \right) = \alpha_f A (T_f - T_b); \quad (16)$$

$$\rho c_p q (T_b - T_0) = \alpha_f A (T_f - T_b). \quad (17)$$

Чтобы определить энергию E , которую получает здание, необходимо знать температуры на выходах T_{e1} , T_{e2} . Это можно сделать путем экспериментов. Из данных параметров можно установить изменяющийся линейный коэффициент температуры γ и T_b следующим образом:

$$\begin{cases} T_{e1} = T_b + \gamma \cdot H_1 \\ T_{e2} = T_b + \gamma \cdot H_2 \end{cases} \Rightarrow \gamma = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{H_1 - H_2} \Rightarrow T_b = T_{e1} - \gamma \cdot H_1.$$

Подставив результаты в уравнение (15), можно получить общую энергию E , содержащуюся в здании.

Предположим, имеется E , целью является исследование q_1 , q_2 и профиля температуры при изменении геометрических параметров атриума, например площади входа, выходов или высоты открытых вентиляционных отверстий. Для этого решается следующая система двух уравнений итерационным методом с помощью двух уравнений (16) и (17):

$$\begin{cases} f_1(T_b, \gamma) = q_1 - q_2 - q = 0 \\ \Rightarrow f_2(T_b, \gamma) = \rho \cdot c_p \cdot q_1 \cdot (T_b + \gamma \cdot H_1 - T_0) + \\ + \rho \cdot c_p \cdot q_2 \cdot (T_b + \gamma \cdot H_2 - T_0) - E = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Это нелинейное уравнение с двумя переменными T_b и γ . Для нахождения приближенного решения нелинейных уравнений можно использовать метод хорд.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Размер каждого вытяжного отверстия в крыше составляет 1,2 м по ширине, 1,4 м по длине. На крыше есть в общей сложности восемь окон в положении высоты H_1 и восемь окон в положении высоты H_2 , которые полностью открываются. Здание имеет только один входной проем со многими дверями, которые могут изменять площадь приточного проема.

Чтобы определить энергию E , которую получает здание, измеряем температуру на приточных и вытяжных отверстиях для случая, когда открываются пять окон на высоте H_1 и три окна на высоте H_2 : $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество вытяжных отверстий в крыше); $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \times 3 = 5,04 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество вытяжных отверстий в крыше), площадь входа составляет: $A_s = 2,1 \times 0,65 \times 6 = 8,2 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество дверей входа). Геометрические параметры измеряемого здания следующие: $H_0 = 19,6 \text{ м}$; $H = 5,0 \text{ м}$; $H_1 = 22,88 \text{ м}$; $H_2 = 20,84 \text{ м}$; $L = 18,54 \text{ м}$.

По прошествии длительного времени тепловые параметры в здании достигают стабильного состояния, измерили температуру на приточных отверсти-

ях $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_1 равна $T_{e1} = 37,8 \text{ }^\circ\text{C}$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_2 составляет $T_{e2} = 36,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Поместив эти параметры в разработанную программу, можно вычислить полученную энергию E от излучения и факторов, которые выделяются в здании, связанных с человеком и оборудованием. Расчет показал, что полученная энергия равна: $E = 118 \text{ кВт}$.

Энергия E будет оставаться постоянной, так как площадь стеклянной крыши для этого здания постоянна и энергия поступает извне. Построение программы для решения уравнений (18), когда E известна, имеет большое значение при проектировании и использовании здания, поскольку имеются возможности ежедневно измерять температуру на крыше и у двери, чтобы знать поток воздуха, температурную стратификацию при изменении площади проема у двери и за порогом. Благодаря программе для вычисления и предложенным формулам архитектор или проектировщик может дать рекомендации по открыванию или закрыванию проемов для достижения желаемой температурной стратификации в здании без необходимости использования измерительного оборудования. Предложенный метод обеспечивает простое решение, помогающее проектировщикам сэкономить время при оценке эффективности вентиляции и выборе оптимального расположения проемов в конструкциях атриумов зданий.

На рис. 3 приведен пример зависимости расхода воздуха от площади приточных отверстий, соответствующий условиям проведения натурного эксперимента и расчетной программы, учитывающей плоскую картину разреза атриума, площадь количества отверстий $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4 \text{ м}^2$; $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 3 = 5,04 \text{ м}^2$. Видно, что, когда вытяжные отверстия полностью закрыты, воздухообмена с внешней средой нет, расход воздуха равен нулю. Когда открываются приточные отверстия, поток воздуха dQ/dA очень быстро увеличивается, но затем градиент потока воздуха dQ/dA уменьшается по мере увеличения площади открывающихся приточных отверстий, а затем насыщается примерно со скоростью $20 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис. 4 представлена зависимость температуры поверхности пола от температуры пограничного слоя. Из-за поглощения тепла от излучения стеклянной крыши температура пограничного слоя воздуха у пола всегда выше температуры поверхности пола. Однако повышение температуры пола и краевого слоя при увеличении площади поверхности пола незначительно. Это можно объяснить тем, что количество излучения от стеклянной крыши постоянно (из-за постоянной площади потолка). И это количество теплового излучения используется для повышения температуры поверхности пола.

На рис. 5 показана температурная стратификация на разных высотах при изменении площади приточных отверстий. Видно, что по мере постепенного

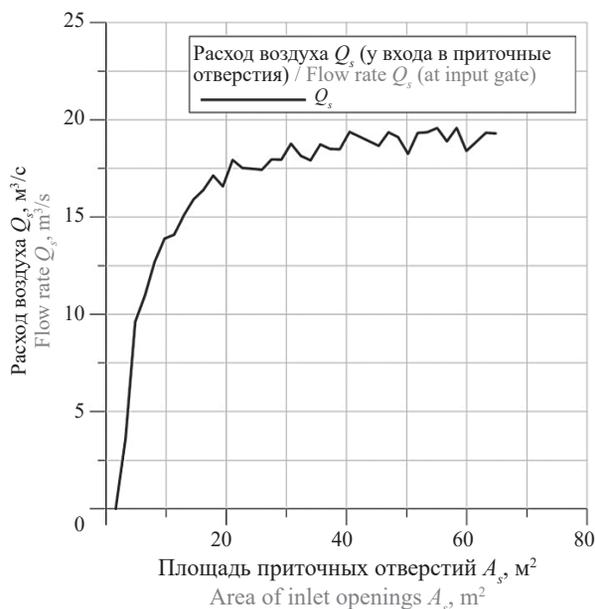


Рис. 3. Зависимость расхода воздуха от площади приточных отверстий при постоянной площади вытяжных отверстий $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4$ м²; $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 3 = 5,04$ м²
Fig. 3. Dependence of air flow rate on the area of inlet openings with constant area of outlet openings $A_1 = 1.4 \cdot 1.2 \cdot 5 = 8.4$ m²; $A_2 = 1.4 \cdot 1.2 \cdot 3 = 5.04$ m²

увеличения площади приточных отверстий коэффициент γ постепенно уменьшается и зависит от параметров: H, T, T_s . Она определена по формуле из формулы (2):

$$\gamma = d(T - T_s)/dH, \quad (19)$$

где T — температура воздуха на любой высоте; T_s — температура воздуха у приточных отверстий.

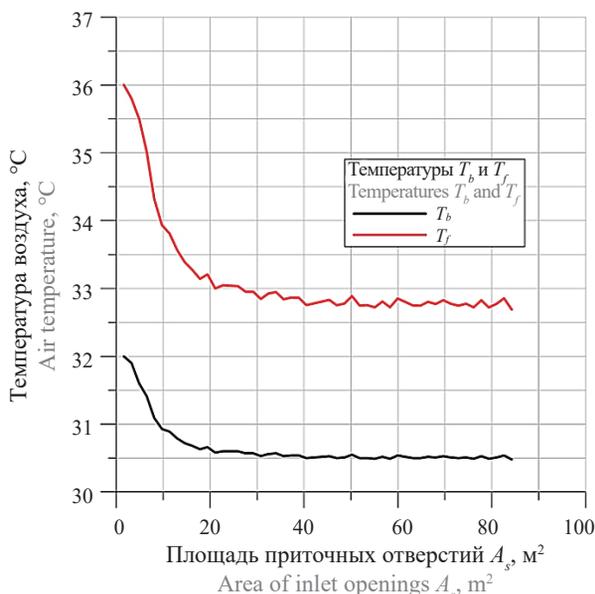


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности пола T_f и температуры пограничного слоя T_b от площади приточных отверстий

Fig. 4. Dependence of the floor surface temperature T_f and boundary layer temperature T_b on the area of inlet openings

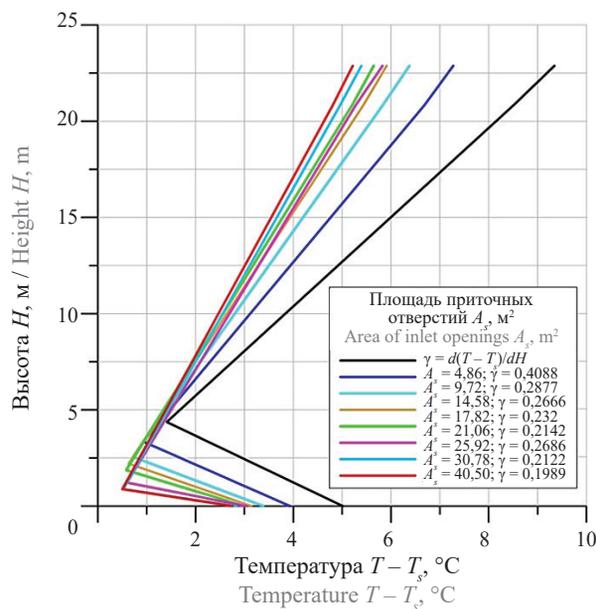


Рис. 5. Зависимость температурной стратификации от высоты над уровнем пола при различных площадях приточных отверстий

Fig. 5. Dependence of temperature stratification on the height above floor level for different areas of inlet openings

Это означает, что разница температур приточных и вытяжных отверстий постепенно уменьшается, что можно объяснить следующим образом: когда приточное отверстие маленькое, объем воздухообмена с внешней средой невелик. На рис. 3 это выражается через небольшой расход при малом открытии приточных отверстий.

Обычно при закрытых дверях здание представляет собой почти закрытую коробку. Тепло, поглощаемое зданием в результате излучения, нагревает воздух в здании, что приводит к повышенному градиенту температур при увеличении приточных отверстий. Маленькая площадь приточных отверстий ведет к более высокой температуре пограничного слоя. По мере постепенного увеличения площади приточных отверстий большее количество воздуха внутри здания обменивается с наружным воздухом, что приводит к разнице температур на разных высотах здания по сравнению с уменьшающейся температурой приточных отверстий, что приводит к уменьшению коэффициента $\gamma = d(T - T_s)/dH$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования получены формулы для определения расхода воздуха в зависимости от высоты, размеров, геометрии и формы атриума, и тепловой стратификации в атриуме здания с естественным охлаждением, влияющие на изменение расхода воздуха, температуры поверхности пола, пограничного слоя и температурной стратификации при изменении площади приточных отверстий с учетом влияния солнечного теплового излучения, пропускаемого стеклянной крышей и поглощаемого внутренними

поверхностями атриума. Рассчитываются следующие два параметра: расход вентиляционного воздуха, график распределения температуры воздуха по высоте помещения. Существуют и другие конструктивные параметры, такие как вентиляционные отверстия, оптимальное соотношение площадей отверстий, высоты здания и т.д. Они могут быть получены из формул, данных для каждой существующей или вновь разработанной модели, по формуле (18).

Таким образом, тепловые характеристики атриума можно улучшить за счет размера и расположения проема при условии, что световой проем в атриуме достаточно велик, а степень открытия приточных отверстий варьируется в зависимости от климатических условий наружного воздуха. Контролируемые площади приточных и вытяжных проемов увеличивают или уменьшают поток воздуха в прилегающих помещениях, определяя оптимальные скорости потока воздуха в этих помещениях. Это влияет на расход электроэнергии на вентиляцию и охлаждение. Исследование в ходе натурного эксперимента эффективных проектных параметров атриумов на их

тепловое состояние поможет проектировщикам и инженерам принять решение о проектировании проемов в естественно вентилируемых зданиях в будущем. Результаты исследования позволят архитекторам и инженерам принимать обоснованное решение о предполагаемых условиях тепловой среды и воздушных потоков. Следовательно, они смогут выбрать оптимальные места расположения проемов, их размеры в зависимости от количества этажей. Кроме того, эти результаты помогут инженерам-проектировщикам сэкономить время на оценку новых проектов, спрогнозировать комфорт в помещениях, оценить эффективность вентиляции, выбрать оптимальную конструкцию открывающихся проемов в кровле зданий и снизить энергопотребление систем механической вентиляции.

В дальнейших исследованиях необходимо изучить влияние размеров, геометрии, формы крыши, материалов покрытия и крепления конструкций кровли атриумов, а также утепленных наружных стен на их эффективность для повышения энергосбережения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Hung W.Y., Chow W.K.* A review on architectural aspects of atrium buildings // *Architectural Science Review*. 2001. Vol. 44. Issue 3. Pp. 285–295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484
2. *Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A.* Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. Pp. 654–670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035
3. *Acred A., Hunt G.R.* Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: A dimensionless design approach // *Building and Environment*. 2014. Vol. 72. Pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007
4. *Wang L., Huang Q., Zhang Q., Xu H., Yuen R.K.K.* Role of atrium geometry in building energy consumption: the case of a fully air-conditioned enclosed atrium in Cold Climates, China // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 151. Pp. 228–241. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.064
5. *Aldawoud A.* The influence of the atrium geometry on the building energy performance // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038
6. *Abdullah A.H., Wang F.* Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification of prediction results // *International Journal of Integrated Engineering*. 2009. Vol. 1. Issue 2. Pp. 79–93.
7. *Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A.* Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. Pp. 654–670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035
8. *Крашенинникова Т.С., Гришкова А.В.* Анализ параметров микроклимата в здании с атриумом в заданных климатических условиях с использованием программы ANSYS FLUENT // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. № 4 (24). С. 46–61. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.04.04.EDNUUZFAB.
9. *Табунициков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В.* Энергоэффективные здания : учебное пособие. М. : АВОК-пресс, 2003. 192 с.
10. *Aldawoud A.* The influence of the atrium geometry on the building energy performance // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038
11. *Holford J.M., Hunt G.R.* Fundamental atrium design for natural ventilation // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. Issue 3. Pp. 409–426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7
12. *Wang X., Huang C., Cao W.* Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 9. Pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002
13. *Holford J.M., Hunt G.R.* Fundamental atrium design for natural ventilation // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. Issue 3. Pp. 409–426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

14. Zhang M., Li N., Zhang E., Hou S., He D., Li J. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: A CFD study // Proceedings — 6th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, ISHVAC. 2009. Vol. 2. Pp. 1240–1247.
15. Moosavi L., Mahyuddin N., Ghafar N. Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study // Building and Environment. 2015. Vol. 94. Pp. 384–394. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.020
16. Andrew A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: A dimensionless design approach // Building and Environment. 2014. Vol. 72. Pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007
17. Li C., Zhang Z., Zhang J., Ji Q. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station // 2011 International Conference on Multimedia Technology. 2011. DOI: 10.1109/ICMT.2011.6003151
18. Laouadi A., Atif M.R., Galasiu A. Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates // Building and Environment. 2002. Vol. 37. Issue 12. Pp. 1289–1316. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00008-2
19. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building // Energy and Buildings. 2009. Vol. 41. Issue 9. Pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002
20. Ji Y., Xu M., Zhang T., He Y. Intelligent parametric optimization of building atrium design: a case study for a sustainable and comfortable environment // Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 5. P. 4362. DOI: 10.3390/su15054362
21. Фам Тхи Хонг Тхам, Соловьев А.К., Корнеев С.С. А field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 2. С. 149–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48167896> DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158

Поступила в редакцию 19 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 января 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Фам Тхи Хонг Тхам** — преподаватель лаборатории строительной физики; **Технологический университет Хошимина**; Вьетнам, г. Хошимин, район 10, 14-й квартал, ул. Ли Тхьонг Киет, д. 268; **Вьетнамский национальный университет Хошимина**; Вьетнам, г. Хошимин, район 10, 14-й квартал, ул. Ли Тхьонг Киет, д. 268; аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики окружающей среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9515-2143, Scopus: 57222268423, ResearcherID: rid21029, ORCID: 0000-0002-7418-2084; ptham0825@gmail.com;

Зьонг Де Тай — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры базового проектирования; **Университет Гран Дай Нгиа**; Вьетнам, г. Хошимин, район Го Вап, 10-й квартал, ул. Нгуен Оан, д. 189; duongdetai@gmail.com;

Алексей Кириллович Соловьев — доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики окружающей среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3821-9431; kafedraarhitektury@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Hung W.Y., Chow W.K. A review on architectural aspects of atrium buildings. *Architectural Science Review*. 2001; 44(3):285-295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484
2. Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 34:654-670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035
3. Acred A., Hunt G. R Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: a dimensionless design approach. *Building and Environment*. 2014; 72:44-52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007
4. Wang L., Huang Q., Zhang Q., Xu H., Yuen R.K.K. Role of atrium geometry in building energy consumption: the case of a fully air-conditioned enclosed atrium in Cold Climates, China. *Energy and Buildings*. 2017; 151:228-241. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.064
5. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance. *Energy and Buildings*. 2013; 57:1-5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038
6. Abdullah A.H., Wang F. Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification

of prediction results. *International Journal of Integrated Engineering*. 2009; 1(2):79-93.

7. Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A. Thermal performance of atria: an overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 34:654-670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035

8. Krashennnikova T., Grishkova A. Analysis of thermal environment in the atrium building under given conditions using the ANSYS fluent software. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2016; 4(24):46-61. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.04.04. EDNUUZFAB. (rus.).

9. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy efficient buildings : manual*. Moscow, AVOK-press, 2003; 192. (rus.).

10. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance. *Energy and Buildings*. 2013; 57:1-5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038

11. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation. *Building and Environment*. 2003; 38(3):409-426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

12. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building. *Energy and Buildings*. 2009; 41(9):907-914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

13. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation. *Building and Environment*. 2003; 38(3):409-426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

14. Zhang M., Li N., Zhang E., Hou S., He D., Li J. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: A CFD study. *Proceedings — 6th International Symposium*

on Heating, Ventilating and Air Conditioning, ISHVAC. 2009; 2:1240-1247.

15. Moosavi L., Mahyuddin N., Ghafar N. Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study. *Building and Environment*. 2015; 94:384-394. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.020

16. Andrew A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: a dimensionless design approach. *Building and Environment*. 2014; 72:44-52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007

17. Li C., Zhang Z., Zhang J., Ji Q. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station. *2011 International Conference on Multimedia Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ICMT.2011.6003151

18. Laouadi A., Atif M.R., Galasiu A. Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates. *Building and Environment*. 2002; 37(12):1289-1316. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00008-2

19. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building. *Energy and Buildings*. 2009; 41(9):907-914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

20. Ji Y., Xu M., Zhang T., He Y. Intelligent parametric optimization of building atrium design: a case study for a sustainable and comfortable environment. *Sustainability*. 2023; 15(5):4362. DOI: 10.3390/su15054362

21. Hong-Tham T. Pham, Solovyev A.K., Korneev S.S. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(2):149-158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48167896> DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158 (rus.).

Received December 19, 2023.

Adopted in revised form on January 29, 2024.

Approved for publication on January 31, 2024.

BIONOTES: **Pham Thi Hong Tham** — lecturer at Laboratory of Building Physics, Faculty of Civil Engineering; **Vietnam National University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT)**; 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam; **Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM)**; 268 Ly Thuong Kiet st., District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam; postgraduate student of the Department of Architectural, Structural Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9515-2143, Scopus: 57222268423, ResearcherID: rid21029, ORCID: 0000-0002-7418-2084; ptham0825@gmail.com;

De Tai Duong — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Basic Design; **Tran Dai Nghia University (TDNU)**; 189 Nguyen Oanh st., District Go Vap, Ho Chi Minh City, Vietnam; duongdetai@gmail.com;

Aleksey K. Solovyev — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural, Structural Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3821-9431; kafedraarxitektury@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 534.833.522.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.358-366

Постановка задач прохождения звука через границы трехмерных сред и через пластины

Аркадий Васильевич Захаров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные физические модели расчета распространения плоских продольных волн через границы сред, основанные на условиях неразрывности звукового давления и колебательной скорости, реализуются только при нормальном падении волн. При всех направлениях распространения волн, отличных от нормального, условия неразрывности не соблюдаются, что не позволяет получить правильные формулы коэффициентов отражения и прохождения волн.

Материалы и методы. В предложенной постановке задачи физическая модель среды распространения волн состоит из кусков волновых лучей, плотно, без разрывов и взаимных проникновений, занимающих все ее пространство (так, как это наглядно происходит с волнами на поверхности воды). Приводится способ определения объемов этих кусков. Их массы аппроксимируются материальными точками, обладающими эффективными значениями колебательных скоростей волн. Прохождение плоской гармонической волны через плоскую границу сред описывается уравнениями сохранения кинетической энергии и сохранения количества движения. Решение этих уравнений дает правильные формулы коэффициентов отражения и преломления волн по колебательной скорости при любых углах их распространения.

Результаты. Предложенная постановка задачи распространения волн через границу сплошных полубесконечных сред пригодна для решения задач распространения звука через слои и, в частности, через пластины. Задача распространения звука через пластину, разделяющую воздушную среду, является фундаментальной в разделах архитектурной и технической акустики, поскольку на ее основе строятся прикладные теории звукоизоляции стен и перекрытий, ограждающих помещения зданий и транспортных средств.

Выводы. Уравнения сохранения до граничной частоты волнового совпадения будут включать эффективное значение колебательной скорости в падающей волне, угол распространения волны, значения массы дискретного тела, представляемого поверхностной плотностью пластины, приведенных масс кусков среды и неизвестные коэффициенты отражения и прохождения колебательной скорости. На частотах выше граничной масса дискретного тела меняется на приведенную массу пластины. Решение системы уравнений сохранения дает правильные формулы коэффициентов прохождения и отражения звука и правильные формулы звукоизоляции в соответствии с изменениями физических моделей распространения волн в разных частотных диапазонах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: условия неразрывности, ширина звукового луча, приведенная масса, уравнения законов сохранения механики, волновое число, физические модели в частотных диапазонах

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Захаров А.В. Постановка задач прохождения звука через границы трехмерных сред и через пластины // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 358–366. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.358-366

Автор, ответственный за переписку: Аркадий Васильевич Захаров, zakharov.arkady@yandex.ru.

The formulation of sound transmission problems through the boundaries of three-dimensional media and through plates

Arkady V. Zakharov

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

ABSTRACT

Introduction. Modern physical models for calculating the propagation of plane longitudinal waves through media boundaries, based on the conditions of continuity of sound pressure and vibrational velocity, are implemented only with normal wave incidence. In all directions of wave propagation other than normal, the continuity conditions are not observed, which does not allow to obtain the correct formulas for the coefficients of reflection and transmission of waves.

Materials and methods. In the proposed formulation of the problem, the physical model of the wave propagation medium consists of pieces of wave rays, tightly, without breaks and mutual penetrations, occupying its entire space (as it clearly happens with waves on the surface of water). A method for determining the volumes of these pieces is given. Their masses are approximated by material points having effective values of vibrational wave velocities. The passage of a plane harmonic wave through a plane boundary of media is described by the equations of conservation of kinetic energy and conservation of the amount of motion. The solution of these equations gives the correct formulas for the coefficients of reflection and refraction of waves in terms of vibrational velocity at any angles of their propagation.

Results. The proposed formulation of the problem of wave propagation through the boundary of continuous semi-infinite media is suitable for solving the problems of sound propagation through layers and, in particular, through plates. The problem of sound propagation through a plate separating the air medium is fundamental in the sections of architectural and technical acoustics, since applied theories of sound insulation of walls and ceilings of buildings and vehicles enclosing premises are based on it.

Conclusions. The conservation equations, up to the boundary frequency of the wave coincidence, will include the effective value of the vibrational velocity in the incident wave, the angle of wave propagation, the values of the mass of a discrete body represented by the surface density of the plate, the reduced masses of the pieces of the medium and unknown coefficients of reflection and passage of the vibrational velocity. At frequencies above the boundary, the mass of the discrete body changes to the reduced mass of the plate. The solution of the system of conservation equations gives the correct formulas for the coefficients of sound transmission and reflection and the correct formulas for sound insulation, in accordance with changes in the physical models of wave propagation in different frequency ranges.

KEYWORDS: continuity conditions, sound beam width, reduced mass, equations of conservation laws of mechanics, wave number, physical models in frequency ranges

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to the reviewers.

FOR CITATION: Zakharov A.V. The formulation of sound transmission problems through the boundaries of three-dimensional media and through plates. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):358-366. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.358-366 (rus.).

Corresponding author: Arkady V. Zakharov, zakharov.arkady@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в отечественной практике и за рубежом активно развивается большое количество методов расчета изоляции воздушного шума однослойных строительных преград [1–5]. Главной предпосылкой их создания является решение фундаментальной задачи архитектурной акустики о распространении волн через границу сплошных полубесконечных сред.

История решения задачи насчитывает более 400 лет, начиная с 1621 г. с открытия Виллебрордом Снеллем законов отражения и преломления световых волн на границе сред, опубликованных Р. Декартом в 1637 г. В 1678–1690 г. Х. Гюйгенс создал волновую теорию света, в рамках которой предложил принцип построения фронта волны. В 1823 г. О.Ж. Френель предложил формулы амплитуд отраженной и прошедшей (преломленной) волн, которые в дальнейшем были применены в акустике.

В русском издании двухтомника Рэля «Теория звука»¹ 1955 г. редактор перевода С.М. Рытов в примечаниях на 91 странице второго тома поместил редакторское примечание следующего содержания: «...Интересно и поучительно отметить одно замечание Лапласа в переписке с Юнгом. Великий аналитик пишет (1817): “Я твердо уверен в том, что проблема распространения волн, проходящих через различные среды, никогда не была разрешена и что она, быть может, выходит за пределы возможностей современного анализа”» (Young, Works, т. 1, с. 374). Можно полагать, что этим цитированием Лапласа и своим замечанием «пучительно» С.М. Рытов

показал, что в середине XX в. положение с проблемой теории распространения волн по сравнению с началом XIX в. существенно не изменилось. При этом благодаря развитию электроники повысились качество и объем экспериментальных исследований, позволивших получить ответы на многие практические вопросы и создать нормативные методы расчета распространения и изоляции звука.

Теоретические исследования в это время были направлены на обоснование уже известных из эксперимента данных. Продолжались попытки решения проблемы в «пределах анализа», примером которых могут служить работы Л.М. Бреховских², Е. Скучика³, М.А. Исаковича⁴. Авторы исходили из условий неразрывности звукового давления и колебательной скорости в точке на плоской границе сред, через которую распространяется плоская продольная гармоническая волна. При нормальном падении звука решение этих уравнений дает формулы Френеля для определения коэффициентов отражения и прохождения по звуковому давлению, хорошо согласующиеся с практикой. Коэффициенты отражения и прохождения по колебательной скорости вычислялись затем дополнительно.

При косом падении звука введение косинусов углов падения и преломления волновых лучей в векторное уравнение неразрывности колебательной скорости не дало формул прохождения и от-

² Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973. 343 с.

³ Скучик Е. Основы акустики. М. : Мир, 1976. Т. 1. 520 с.

⁴ Исакович М.А. Общая акустика. М. : Наука, 1973. С. 131–132.

¹ Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. Т. 2. 476 с.

ражения, согласующихся с практикой. В процессе исследований предлагались новые физические модели, комбинации известных физических величин и введение различных новых величин, например, таких как «относительное волновое сопротивление», «медленность звука», «акустический импеданс на границах сред» и т.п.

Далее путем математических преобразований были получены формулы, совпадающие с формулами, известными из эксперимента. По признанию Л.М. Бреховских, автора одного из указанных исследований: «... я в первую очередь стремился сделать ясной для читателя физическую картину рассматриваемых явлений. Что же касается математической строгости, то возможно, что она не всюду оказалась достигнутой в достаточной степени». Принимая во внимание сказанное автором, а также разнообразие физических моделей, применяемых другими авторами для достижения одной цели, можно заключить, что подходящая физическая модель еще не найдена и, по-видимому, необходима иная постановка задачи, дающая возможность учесть не принимаемые ранее в расчет существенные особенности процесса распространения волн.

Эти особенности можно увидеть на рис. 1, на котором представлены схемы вариантов косоуго и нормального распространения плоской продольной волны через отрезок OK линии границы раздела сред. На схеме отрезок MN означает фрагмент линии фронта косо падающей волны, построенной по принципу Гюйгенса. Он же показывает ширину пучка лучей падающей волны. Отрезки линий OD , EK и KC представляют фрагменты линий фронтов, соответственно, падающей, отраженной и преломленной волн. Все остальные наклонные сплошные линии схемы ограничивают ширину пучков косо падающей b_1 , отраженной b_1 и преломленной волн b_2 . Две вертикальные пунктирные линии O и K ограничивают единую ширину b пучков нормально падающей, отраженной и прошедшей волн. На схеме также указаны векторы распространения: M — падающей, E — отраженной и C — преломленной волн.

Из рассмотрения схемы на рис. 1 можно отметить важные особенности:

- 1) при нормальном распространении волны через границу сред ширина (произвольно выбранная) пучка падающей волны совпадает с шириной пучков отраженной и прошедшей волн и своим следом на границе сред;
- 2) при косом распространении волны через границу сред ширина следов падающей, отраженной и преломленной волн равна и совпадает с шириной следа нормально падающей волны, что и представляет собой обеспечение условий неразрывности при любых углах;
- 3) ширина пучков лучей падающей, отраженной и преломленной волн пропорциональна коси-

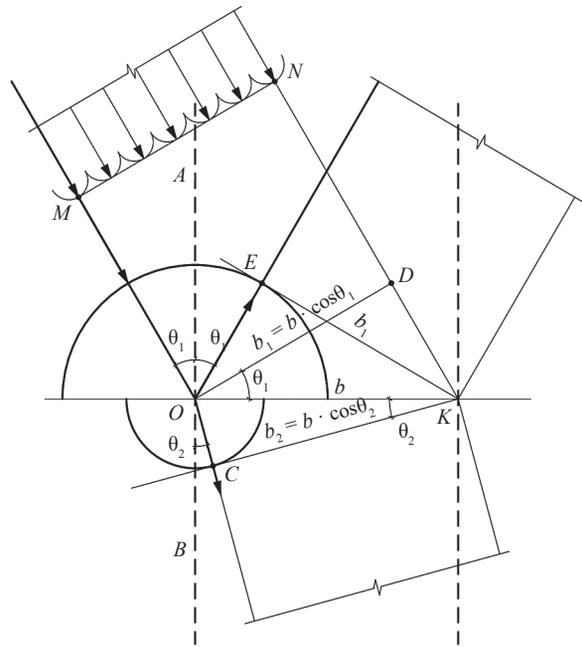


Рис. 1. Соотношение ширины волновых лучей, обеспечивающее неразрывность на границе сред

Fig. 1. The ratio of the widths of the wave rays, ensuring continuity at the boundary of the media

нусам их углов к нормали границы сред. Этот важный факт единства следа всех лучей обеспечивает условия неразрывности на границе сред и поэтому создание правильных формул коэффициентов отражения и преломления волн.

Поскольку общепринятый в научной литературе термин «луч» имеет узкое назначение определения направления распространения волны (или вектора), необходимо ввести термины «волновой луч» и «ширина волнового луча». Это позволит четко определять условия неразрывности при решении задач о распространении волн. В дальнейшем в этой статье будут применяться эти термины.

Постановка задачи. Указанные особенности, которые являются следствием свойства неразрывности, не рассматривались в исходных уравнениях неразрывности, так как физической моделью, принятой к расчету, была только диаграмма векторов колебательных скоростей (Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. С. 9). Поэтому для решения рассматриваемой задачи необходимо выбрать физическую модель передачи движения, в которой должна участвовать не только скорость, но и ее носитель, т.е. масса, величина которой и определяется шириной волнового луча.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе «Рассуждение о законах передачи движения», 1724 г., И. Бернулли⁵, используя две сопря-

⁵ Бернулли И. Избранные сочинения по механике. М.-Л. : Объедин. науч.-техн. изд., 1937. 297 с.

женные физические величины — массу и скорость, описывающие движение, предложил запись двух фундаментальных законов классической механики: закона сохранения кинетической энергии и закона сохранения количества движения. В современной интерпретации для случая центрального удара двух тел, представленных материальными точками m_1 и m_2 , в случае удара движущегося первого тела по покоящемуся второму уравнение закона сохранения кинетической энергии может иметь следующий вид:

$$\frac{m_1 v^2}{2} = \frac{m_1 (v\beta')^2}{2} + \frac{m_2 (v\alpha')^2}{2}; \quad (1)$$

закона сохранения количества движения:

$$m_1 v = m_1 v\beta' + m_2 v\alpha', \quad (2)$$

где v — начальная скорость ударяющего тела; $v\beta'$ — скорость отскока; $v\alpha'$ — скорость передачи движения.

Совместное решение уравнений законов сохранения дает следующие формулы коэффициентов отскока и передачи:

$$\beta' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}; \quad \alpha' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2}. \quad (3)$$

Формулы О. Френеля для коэффициентов отражения и прохождения колебательной скорости волн⁴ представлены так:

$$V = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}; \quad W = \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}, \quad (4)$$

где ρ и c — плотность среды и скорость распространения звука.

Использование законов сохранения классической механики дает возможность создания физической модели отражения и прохождения продольных воздушных волн. Это позволяет полагать, что существует общность между процессами передачи движения посредством соударения дискретных тел и посредством волнового движения в сплошных средах. В целях подтверждения гипотезы попробуем преобразовать размерность всех членов формулы (4), введя в них общий множитель S/f , не оказывающий влияния на итог расчетов, получим размерность членов формул (3), кг; где S — площадь поперечного сечения луча, m^2 ; f — текущая частота, s^{-1} . В результате при нормальном падении звука достигается полная аналогия между прохождением звука через границу сред и соударением тел.

С учетом второго закона Снелля (Снелиуса) и принципа Гюйгенса построения фронта волны рассмотрим возможность аналогии при косом падении звука. Снелль показал, что падающий, отраженный, преломленный лучи и нормаль к границе сред в точке пересечения лучей лежат в одной плоскости. Отсюда можно задать толщину всех перечисленных волновых лучей равной единичной толщине слоя разделенных границей сред. Также ширину луча, нормально падающего на границу сред, можно задать равной единице.

Тогда ширина этих лучей будет пропорциональна соответствующим им косинусам. Примем это положение за исходный пункт записи уравнений сохранения.

В этом случае скалярное уравнение, описывающее закон сохранения кинетической энергии при падении волны под углом θ_1 и преломлении под углом θ_2 к нормали границы сред, примет вид:

$$\frac{(\rho_1 \lambda_1 \cos \theta_1) \cdot v^2}{2} = \frac{(\rho_1 \lambda_1 \cos \theta_1) \cdot (v\beta)^2}{2} + \frac{(\rho_2 \lambda_2 \cos \theta_2) \cdot (v\alpha)^2}{2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \text{с}^{-2}. \quad (5)$$

Ширина лучей, обеспечивающая единый след на границе сред, определяется косинусами в числителях каждого члена уравнения.

В знаменателях каждого члена векторного уравнения сохранения количества движения присутствуют косинусы направления колебаний продольных волн в каждом луче:

$$(\rho_1 \lambda_1 \cos \theta_1) \cdot \frac{v}{\cos \theta_1} = (\rho_1 \lambda_1 \cos \theta_1) \times \frac{v\beta}{\cos \theta_1} + (\rho_2 \lambda_2 \cos \theta_2) \cdot \frac{v\alpha}{\cos \theta_2}, \text{ кг} \cdot \text{мс}^{-1}. \quad (6)$$

Сокращение косинусов приводит к уравнению:

$$(\rho_1 \lambda_1) \cdot v = (\rho_1 \lambda_1) \cdot (v\beta) + (\rho_2 \lambda_2), \text{ кг} \cdot \text{мс}^{-1}, \quad (7)$$

которое показывает, что количество колебательного движения остается постоянным и равным значению при нормальном падении волны при любых углах распространения плоской гармонической волны. Условия неразрывности задаются косинусами, управляющими шириной волновых лучей, обеспечивающих единый след на границе сред. Полученные совместным решением уравнений (5) и (6) формулы коэффициентов отражения и преломления (прохождения) будут иметь вид:

$$\alpha = \frac{\frac{2\rho_1 \lambda_1}{\cos \theta_1}}{\frac{\rho_1 \lambda_1}{\cos \theta_1} + \frac{\rho_2 \lambda_2}{\cos \theta_2}}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\frac{\rho_1 \lambda_1}{\cos \theta_1} - \frac{\rho_2 \lambda_2}{\cos \theta_2}}{\frac{\rho_1 \lambda_1}{\cos \theta_1} + \frac{\rho_2 \lambda_2}{\cos \theta_2}}. \quad (9)$$

Путем умножения числителей и знаменателей формул (8) и (9) на частоту f преобразуем величины $\rho\lambda$ в ρc , в результате формулы примут привычный в акустике вид, представленный в научных работах Е. Скучика и М.А. Исаковича.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В природе и технике встречаются задачи взаимодействия волновых объектов и дискретных тел.

К их числу относится и рассматриваемая задача. Причем пластина, в зависимости от частотного диапазона, может рассматриваться как несжимаемое тело и как волновой объект. Для описания взаимодействия тела с волновым объектом необходимо иметь возможность волновой объект представить сосредоточенной массой, действие которой эквивалентно действию волны. В аналогичных случаях квантовой (волновой) механики используется постоянная Планка, аналогом которой в акустике служит волновое число $k = 2\pi/\lambda$, позволяющее на любой частоте массу части среды, заключенной в объеме волнового луча, представить массой эквивалентного действия, которая получила упомянутое выше название «приведенной массы» [6, 7]:

$$\mu = \frac{\rho S}{k} = \frac{\rho S \lambda}{2\pi}, \text{ кг}, \quad (10)$$

где $S = 1 \times 1$ — площадь поперечного сечения волнового луча, м².

В результате такой аппроксимации передачу продольной составляющей волнового движения в воздухе фрагменту пластины можно рассматривать как соударение тел, представляемых материальными точками, описываемое уравнениями законов сохранения механики.

В задачах архитектурной акустики двухмерная среда или «слой», состоящий из твердого материала, представляется пластиной, которая в виде стен или перекрытий выполняет функцию звукоизоляции помещений. В пластине возможны преимущественно изгибные волны, скорость распространения которых зависит от частоты. Здесь волновое число выполняет другую функцию: позволяет определить предельную частоту звука $f_{\text{пр}}$, ниже которой размер тела (в данном случае — толщина пластины) в направлении распространения волны $t = 1/k$, м, в этом объекте можно рассматривать как несжимаемое тело, и выше которой — как часть среды, в которой возможно волновое движение:

$$f_{\text{пр}} = \frac{c}{2\pi t}, \quad (11)$$

где c — скорость распространения волны, мс⁻¹.

С целью унификации расчетов во всех случаях в уравнениях законов сохранения вместо величины $\rho\lambda$ можно писать μ . Тогда в общем случае обладателями скорости в уравнениях сохранения будут массы тел m и приведенные массы сред μ .

В пластинах, разделяющих воздушные среды помещений зданий, под воздействием звука на низких и средних частотах нормируемого в архитектурной акустике диапазона 100–3200 Гц возникают поперечные колебания в виде изгибных волн, на высоких частотах — сдвиговых и на сверхвысоких частотах — продольных волн. Скорости распространения продольных волн в воздухе, сдвиговых и продольных — в пластине приблизительно постоянны, скорость распространения изгибных волн

возрастает с увеличением частоты колебаний. В связи с этим область частот существования изгибных волн подразделяется на два диапазона. В первом частотном диапазоне длины изгибных волн меньше длин волн в воздухе, во втором диапазоне — больше. На граничной частоте между диапазонами длины волн в пластине и воздухе совпадают. На частотах выше граничной частоты всегда найдется угол падения волны в воздухе, след которой на пластине совпадет с длиной изгибной волны. Поэтому второй участок области существования изгибных волн в пластине называют диапазоном «волнового совпадения», а иногда — «пространственно-частотного резонанса». При этом необходимо отметить, что резонансы возникают при совпадении собственных частот колеблющегося тела с частотой вынужденных колебаний. Собственных частот в средах, не имеющих границ, как известно, не бывает. По этой причине в них не бывает и резонансов. Пластины, применяемые в качестве ограждающих помещения стен и перекрытий, всегда ограничены в размерах и поэтому имеют собственные частоты, которые к «пространственно-частотному резонансу» отношения не имеют. Режим распространения волны через пластины, разделяющие среды точно такой же, как и прохождение волны через границу сред, т.е. режим волнового совпадения, является режимом неразрывности.

В первом частотном диапазоне в силу несоответствия длин волн среды и пластины при любых углах падения режим неразрывности не реализуется. Физическая модель рассматривается как несжимаемый по толщине t слой, обладающий поверхностной плотностью ρt , кгм⁻², аппроксимируемый в материальную точку m , кг.

Обычные стены и перекрытия зданий — это пластины, в которых в нормируемом в строительстве диапазоне частот преобладают изгибные волны. Для первого диапазона существования изгибных волн пластина представляется сосредоточенной массой m , а воздушная среда — приведенной массой μ , с общим названием «материальная точка».

На рис. 2 приведены три схемы распространения волны через пластину, разделяющую воздушную среду. На схеме *a* представлено нормальное прохождение звука, при котором ширина b падающего, отраженного и прошедшего волновые лучи равна ширине их следа OA на пластине. На схеме *b* при косом падении волны ширина всех волновых лучей равна b , но их следы выходят за пределы ширины следа, равной ширине луча нормально падающей волны. Это указывает на приводящее к получению ошибочной формулы изоляции звука нарушение неразрывности на размер AB , который увеличивается по мере увеличения угла падения волны.

Примем как исходное значение μ при нормальном падении звука. Тогда уравнение сохранения кинетической энергии и уравнение сохранения ко-

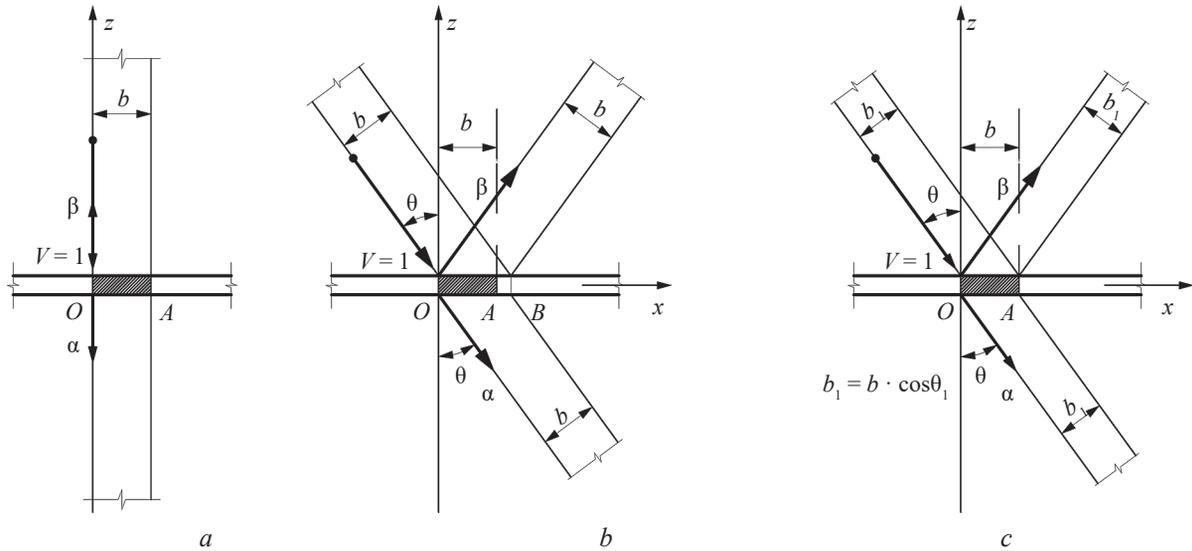


Рис. 2. Распространение звукового луча через пластину, разделяющую среду

Fig. 2. Propagation of a sound beam through a plate separating the medium

личества движения при распространении волны под углом θ к нормали границы сред могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{(\mu \cos \theta) \cdot v^2}{2} = \frac{(\mu \cos \theta) \cdot (v\beta)^2}{2} + \frac{(\mu \cos \theta + m) \cdot (v\alpha)^2}{2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}; \quad (12)$$

$$\frac{(\mu \cos \theta) \cdot v}{\cos \theta} = \frac{(\mu \cos \theta) \cdot (v\beta)}{\cos \theta} + \frac{(\mu \cos \theta + m) \cdot (v\alpha)}{\cos \theta}, \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}; \quad (13)$$

$$\mu \cdot v = \mu \cdot (v\beta) + \left(\frac{\mu + m}{\cos \theta} \right) \cdot (v\alpha), \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (14)$$

В уравнении (12), также как и в уравнении (5), косинусы в числителях задают ширины лучей падающей, отраженной и прошедшей волн, обеспечивая единство их следа (т.е. условия неразрывности) на пластине. В уравнении (12), также как и в уравнении (6), косинусы в числителях сокращаются косинусами в знаменателях, обозначающими направления векторов колебаний падающей, отраженной и прошедшей волн. При этом обнаружился интересный факт: единственный косинус в уравнении (13), переместившийся из числителя в знаменатель, сохранил свою функцию обеспечения неразрывности — он «вытянул» ширину участка пластины до размера следа лучей. Таким образом, условия неразрывности в уравнениях сохранения кинетической энергии и количества движения обеспечены. При этом необходимо отметить, что уравнение (13) правильно передает физическую суть закона сохранения, а уравнение (14) — удобно в применении.

Совместное решение уравнений (12) и (13) дало выражение коэффициента прохождения и фор-

мулы изоляции воздушного шума пластиной следующего вида:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{m}{2\mu \cdot \cos \theta}}; \quad (15)$$

$$R = 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 20 \lg \left(1 + \frac{m}{2\mu_a \cos \theta} \right) = 20 \lg \left(1 + \frac{\pi f m}{\rho_0 c_0 \cos \theta} \right), \text{ дБ}, \quad (16)$$

где μ_a — приведенная масса воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$; ρ_0 — плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; c_0 — скорость звука в воздухе, $\text{м} / \text{с}$.

Непривычный, но ожидаемый некоторыми акустиками (например, И.И. Клюкиным⁶, с. 131) результат: при обеспечении условий неразрывности косинус угла падения в формуле звукоизоляции переместился из числителя в знаменатель. Теперь изоляция звука будет минимальной при нормальном падении звука и возрастать по мере увеличения угла θ .

На сегодняшний день в отечественной и зарубежной литературе, посвященной звукоизоляции, например в работах [8–12], косинус угла θ стоит в числителе формулы звукоизоляции. Это приводит к тому, что в разных методах расчетная звукоизоляция на углах падения звука, превышающих 75–80 градусов, становится значительно ниже реальной. Такое положение вынуждает придерживаться гипотезы отсутствия звуковых волн на указанных углах падения, что противоречит действительности. Формула (16) такое противоречие снимает.

Формула (16) действует до граничной частоты волнового совпадения, выше которой пластина

⁶ Клюкин И.И. Борьба с шумом и вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971. 416 с.

из «статуса» тела переходит в «статус» среды (волновода), где величина m меняется на величину $\mu_{\text{изг}}$ — приведенную массу среды распространения изгибных волн. Формула (16) принимает следующий вид:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 20 \lg \left(1 + \frac{\mu_{\text{изг}}}{2\mu_a \cos \theta} \right), \text{ дБ.} \quad (17)$$

Как видно, на частотах выше граничной частоты волнового совпадения значение звукоизоляции понижается на величину 2λ , т.е. примерно на 16 дБ.

Эта формула применима до предельной частоты существования в рассматриваемой пластине изгибных волн, после которой она перестает быть несжимаемой и поэтому в пределах ее толщины становится возможным распространение сдвиговых и продольных волн [13, 14]. Скорости распространения этих волн не зависят от частоты, что делает изоляцию пластиной независимой от частоты звука. Поэтому в нормативных спектрах наклонная линия графика изоляции воздушного шума переходит в горизонтальное положение. Степень звукоизоляции в рассматриваемом диапазоне определяется двумя переходами продольной волны через границы сред, которыми являются обе поверхности пластины. Коэффициент прохождения продольной волны через пластину равен удвоенному результату, полученному по формуле (6), где величины ρ_1 , в соответствии с выражением (10), можно заменить на величину μ , сохранив при этом порядок индексов сред на пути распространения волны.

Формулы (6) и (16) выведены из представлений неограниченности сред в направлениях распространения волн [15–18]. В реальных ситуациях пластина всегда ограничена в размерах, сопрягаясь по контуру с различными конструктивными элементами. Волны, возникшие в пластине от внешнего

воздействия, многократно отражаясь от ее контура, образуют интерференционное поле, максимум колебаний которого приходится на собственные частоты пластины. На этих частотах возникают резонансы, снижающие степень звукоизоляции, определяемой формулами (16) и (17) [19–21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный в статье материал позволяет сделать следующие выводы:

- показано, что решение задачи прохождения волн через границы сред, не принимая во внимание зависимость ширины волновых лучей от угла их наклона к границе сред, приводит к потере непрерывности и некорректному выводу коэффициентов отражения и преломления;
- предложенные модели прохождения волн через границы сред и через пластины обеспечивают условия непрерывности и возможность применения законов сохранения механики и, следовательно, дают получение правильных формул коэффициентов прохождения и отражения волн при любых углах распространения;
- результаты решения задач по прохождению звука через границы сред и пластины позволяют утверждать возможность существования свойства дискретности сплошных сред.

Принципы, лежащие в основе построения представленных выше физических моделей прохождения звука, могут быть распространены и на решения других задач строительной акустики, таких как, например, вычисление изоляции воздушного шума многослойных ограждений и вычисление изоляции ударного шума междуэтажных перекрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Щелоков Ю.А. Универсальная формула расчета звукоизоляции однослойных преград // *Noise Theory and Practice*. 2016. Т. 2. № 1 (3). С. 2–7. EDN VOQLPH.
2. Zdražilova N., Donova D., Skotnicova I. Analysis of predictive calculation methods of airborne sound insulation // *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 835. Pp. 573–578. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.835.573
3. Ye J. Applying immune algorithms to the calculation of sound insulation of walls // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 584–586. Pp. 1853–1857. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1853
4. Rodríguez-Molares A. A new method for auralisation of airborne sound insulation // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. Issue 1. Pp. 116–121. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.017
5. Huang X.F., Yang Z.X., Yang Y. Prediction on sound insulation to a single-leaf wall // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 594–597. Pp. 2824–2827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824
6. Захаров А.В. О правильных коэффициентах отражения и преломления волн при косом распространении звука через границу сред // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 6. С. 103–105. EDN ICVOFF.
7. Захаров А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 11. С. 50–53. EDN PIBAZP.
8. Fahy F., Gardonio P. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, Academic Press, 2006. 656 p.
9. Бобылев В.Н., Монич Д.В., Тишков В.А., Гребнев П.А. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций : моно-

графия. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. 118 с. EDN UKCQFL.

10. *Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A.* Experimental study of sound insulation in multilayer building partitions // *Noise Control Engineering Journal*. 2014. Vol. 62. Issue 5. Pp. 354–359. DOI: 10.3397/1/376234

11. *Овсянников С.Н.* Развитие теории статистического энергетического анализа для расчета звукоизоляции в гражданских зданиях // *Вестник ТГАСУ*. 2000. № 1. С. 72–83.

12. *Ovsyannikov S.N., Leliuga O.V., Gradov V.A.* Calculation model of sound and vibration propagation in a building fragment based on the method of statistical energy analysis // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 4. P. 042006. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042006

13. *Захаров А.В., Салтыков И.П.* Влияние сдвиговых и продольных волн на звукоизоляцию в третьем диапазоне стандартного частотного спектра // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3 (87). С. 325–344. EDN НОВВМҚ.

14. *Zakharov A.V., Saltykov I.P.* The third frequency range of the sound insulation plot of the single-layer partitions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032064. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032064

15. *Zakharov A.V.* Discrete models upon calculation of soundproofing by solid plate // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119. Issue 10. Special Issue C. Pp. 439–443. EDN XYDGVV.

Поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2024 г.

Одобрена для публикации 16 января 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Аркадий Васильевич Захаров** — кандидат технических наук, профессор кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 689180, Scopus: 57194597849, ORCID: 0000-0001-7693-2099; zakharov.arkady@yandex.ru.

REFERENCES

1. Schelokov Y. Universal formula of calculation of sound insulation of single-layer barriers. *Noise Theory and Practice*. 2016; 2(1):2-7. EDN VOQLPH. (rus.).

2. *Zdražilova N., Donova D., Skotnicova I.* Analysis of predictive calculation methods of airborne sound insulation. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 835:573-578. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.835.573

3. Ye J. Applying immune algorithms to the calculation of sound insulation of walls. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 584-586:1853-1857. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1853

16. *Салтыков И.П.* Сравнение результатов расчета звукоизоляции однослойных перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами с результатами традиционных методов расчета // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 2. С. 173–180. EDN PQDGPFL.

17. *Saltykov I.P.* An engineering estimation method of the sound insulation of massive partitions on the base of design model with lumped parameters // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032046

18. *Pirmatov R., Rashidov J., Pirmatov K.* Method for calculating the insulation of airborne sound by enclose from volumetric-block buildings // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 264. P. 02057. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402057

19. *Разживин В.М.* Изоляция воздушного шума легкими ограждающими конструкциями зданий с учетом их закрепления : монография. Пенза : ПГУАС, 2014. 120 с. EDN WGRPMH.

20. *Салтыков И.П.* Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 3. С. 353–367. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42665439> DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.353-367

21. *Zakharov A.V., Saltykov I.P.* The influence of wave resonance phenomena on the sound insulation of a single-layer building partition in the application of calculation models with the concentrated parameters // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. Issue 3. P. 032068. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032068

4. Rodríguez-Molares A. A new method for auralisation of airborne sound insulation. *Applied Acoustics*. 2013; 74(1):116-121. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.017

5. Huang X.F., Yang Z.X., Yang Y. Prediction on sound insulation to a single-leaf wall. *Advanced Materials Research*. 2012; 594-597:2824-2827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824

6. *Zakharov A.V.* On the correct coefficients of reflection and refraction of waves during oblique propagation of sound through the boundary of media. *Innovation and Investment*. 2022; 6:103-105. EDN ICVOFF. (rus.).

7. Zakharov A.V. Discrete models of passage of waves for calculation of sound insulation in buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 11:50-53. EDN PIBAZP. (rus.).
8. Fahy F., Gardonio P. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response. 2nd Edition*. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2006; 656.
9. Bobylev V.N., Monich D.V., Tishkov V.A., Grebnev P.A. *Reserves for increasing the sound insulation of single-layer enclosing structures : monograph*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2014; 118. EDN UKCQFL. (rus.).
10. Bobilyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental study of sound insulation in multilayer building partitions. *Noise Control Engineering Journal*. 2014; 62(5):354-359. DOI: 10.3397/1/376234
11. Ovsyannikov S.N. Development of the theory of statistical energy analysis for the calculation of sound insulation in civil buildings. *Proceedings of the Tomsk State University of Architecture and Building*. 2000; 1:72-83. (rus.).
12. Ovsyannikov S.N., Leliuga O.V., Gradov V.A. Calculation model of sound and vibration propagation in a building fragment based on the method of statistical energy analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(4):042006. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042006
13. Zakharov A.V., Saltykov I.P. An influence of shear and longitudinal waves on sound insulation in the third range of the standard frequency spectrum. *Engineering journal of Don*. 2022; 3(87):325-344. EDN HOBBMQ. (rus.).
14. Zakharov A.V., Saltykov I.P. The third frequency range of the sound insulation plot of the single-layer partitions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032064. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032064
15. Zakharov A.V. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid plate. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018; 119(10 Special Issue C):439-443. EDN XYDGVV
16. Saltykov I.P. The comparison of sound insulation calculations results for single-layer partitions, which are based on concentrate parameters model, with the results of conventional calculation methods. *Innovation and Investment*. 2020; 2:173-180. EDN PQDGP. (rus.).
17. Saltykov I.P. An engineering estimation method of the sound insulation of massive partitions on the base of design model with lumped parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032046
18. Pirmatov R., Rashidov J., Pirmatov K. Method for calculating the insulation of airborne sound by enclosure from volumetric-block buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:02057. DOI: 10.1051/e3s-conf/202126402057
19. Razzhivin V.M. *The air noise insulation by the use of lightweight enclosing structures of the buildings, subject to their fastening : monograph*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2014; 120. EDN WGRPMH. (rus.).
20. Saltykov I.P. Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(3):353-367. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42665439> DOI: 10.22227/19970935.2020.3.353-367 (rus.).
21. Zakharov A.V., Saltykov I.P. The influence of wave resonance phenomena on the sound insulation of a single-layer building partition in the application of calculation models with the concentrated parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079(3):032068. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032068

Received June 23, 2023.

Adopted in revised form on January 16, 2024.

Approved for publication on January 16, 2024.

BIONOTES: Arkady V. Zakharov — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 689180, Scopus: 57194597849, ORCID: 0000-0001-7693-2099; zakharov.arkady@yandex.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376

Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий

Вячеслав Сергеевич Широков¹, Татьяна Александровна Белаш²,
Татьяна Евгеньевна Гордеева¹

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия;

² НИЦ «Строительство»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Активное внедрение модульных зданий в практику современного строительства вызывает необходимость развития методов их расчета. Однако отсутствуют какие-либо специализированные руководства по проектированию модульных зданий. При разработке рекомендаций проектирования невозможно обойтись только численными методами расчета. Поэтому создание аналитического метода расчета модульных зданий — актуальное направление исследований. Рассматривается вопрос определения усилий в элементах модульных зданий с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями.

Материалы и методы. Определение усилий в элементах модульных зданий от вертикальных нагрузок с высокой точностью можно проводить с помощью известных выражений строительной механики. Главной трудностью является установление динамических воздействий (пульсация ветра и сейсмика). Предлагается использовать консольную схему сооружения с разложением масс в уровне перекрытий. В результате вычислений образуется набор инерционных сил от пульсации и сейсмического воздействия. Для большего упрощения вычислений написана программа Modular. Программа удобна для проведения предварительных и вариантных расчетов и исследований конструкций модульных зданий.

Результаты. Представленный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий показывает хорошую сходимость результатов с методом конечных элементов. На конкретном примере показано, что расхождение в определении усилий от вертикальных нагрузок практически отсутствует. Расхождение от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих составляет 4,2–16,6 % для изгибающих моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность определения усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

Выводы. Метод удобен для применения на стадии качественной оценки проектных решений, вариантных расчетов и поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные здания, частота собственных колебаний, методы расчета, нагрузки, усилия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широков В.С., Белаш Т.А., Гордеева Т.Е. Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 367–376. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Сергеевич Широков, ShirokovViacheslav@gmail.com.

Analytical method for determining the stress-strain state of modular buildings

Viacheslav S. Shirokov¹, Tatyana A. Belash², Tatyana E. Gordeeva¹

¹ Samara State Technical University (SamGTU); Samara, Russian Federation;

² Research Center “Construction”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Active introduction of modular buildings into the practice of modern construction causes the necessity to develop methods of their calculation. At the same time, there are no specialized guidelines for the design of modular buildings. It is impossible to manage only with numerical methods of calculation for forming design recommendations. Therefore, the creation of an analytical method of calculation of modular buildings is an important area of research. The question of determination of forces in elements of modular buildings with bearing columns and rigid intramodular connections is considered.

Materials and methods. The determination of forces in the elements of modular buildings from vertical loads can be carried out with high accuracy using well-known formulas of building mechanics. The main difficulty is the determination of dynamic effects (wind pulsation and seismic load). It is proposed to use a cantilever construction scheme with the decomposition of masses at the floor level. As a result of calculations, a set of inertial forces is formed from pulsation and seismic action. Modular programme was written to simplify the calculations. The programme is convenient for making preliminary and variant calculations and research of modular building structures.

Results. The presented analytical method for determining the forces in the elements of modular buildings shows good

convergence of the results with the finite element method. On a concrete example, it is shown that there is practically no discrepancy in determination of forces from vertical loads. The discrepancy from the combined effect of the static and pulsation components is 4.2–16.6 % for bending moments and 1.3–6 % for longitudinal forces. The discrepancy in determining the forces from the seismic load is within the range of 5–10 % for both bending moments and longitudinal forces.

Conclusions. The method is convenient for application at the stage of qualitative assessment of design solutions, variant calculations and search for rational design solutions of modular buildings.

KEYWORDS: modular buildings, natural vibration frequency, calculation methods, loads, internal forces

FOR CITATION: Shirokov V.S., Belash T.A., Gordeeva T.E. Analytical method for determining the stress-strain state of modular buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):367-376. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376 (rus.).

Corresponding author: Viacheslav S. Shirokov, ShirokovViacheslav@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Активное внедрение модульных зданий в практику современного строительства [1–7] вызывает необходимость развития методов их расчета. Главным инструментом расчета строительных конструкций служат программные комплексы (ПК), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Однако при поиске рациональных конструктивных решений зданий и оценке качества принятых предпроектных решений этот метод является довольно трудоемким, так как требует составления большого числа расчетных схем.

Для модульных зданий в силу их особенностей необходима тщательная проработка на стадии проектирования [8]. В работах [9–11] на базе анализа модульного строительства в Сингапуре приводятся ключевые направления для формирования руководства по проектированию. Отечественные авторы также отмечают, что в настоящее время имеется потребность в совершенствовании нормативной базы проектирования модульных зданий [2]. При разработке рекомендаций проектирования невозможно обойтись только численными методами расчета. Поэтому создание аналитического метода расчета модульных зданий — актуальное направление исследований.

В данной работе рассматривается вопрос определения усилий в элементах модульных зданий с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Каркас модуля с несущими колоннами состоит из стоек, расположенных по углам, и двух горизонтальных рам (нижней и верхней). Вертикальные нагрузки действуют на балки настила и передаются на горизонтальные ригели. Поперечные нагрузки воспринимаются колоннами. Расчетная схема модульного блока представлена на рис. 1.

Определение усилий в элементах модульного здания от статических нагрузок (собственный вес, снеговая и полезная нагрузки) можно осуществлять с помощью известных аналитических решений, приведенных, например, в «Справочнике по сопротивлению материалов» под редакцией Г.С. Писаренко, расхождение с результатами по МКЭ практически отсутствует. Более сложный вопрос — определение усилий от динамических воздействий (пульсация

ветра, сейсмика). Основной характеристикой для установления таких воздействий является частота собственных колебаний зданий. Вопрос выявления частот собственных колебаний исследовался различными авторами [12–17].

В работе [17] проведено сопоставление результатов определения собственных частот колебаний разных авторов с упрощенной формулой для вычисления первой частоты, представленной в австралийских нормах. Согласно полученным сведениям для модульных зданий, упрощенная формула справедлива далеко не во всех случаях.

Соавтором настоящей статьи В.С. Широковым в трудах [18, 19] показано, что для стальных зданий из составленных модулей с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями при расчете колебаний здания можно рассматривать плоскую вертикальную раму одного модуля. Первая собственная частота колебаний с высокой точностью вычисляется следующим образом:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h}\right)}}, \quad (1)$$

где E — модуль упругости стали; I_1 — момент инерции колонны; g — ускорение свободного падения;

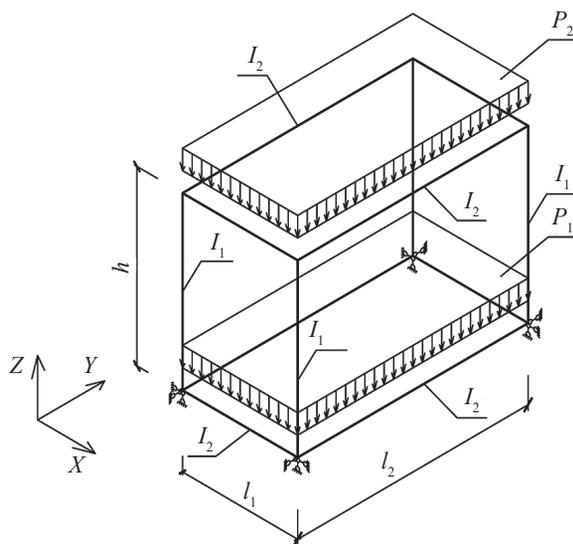


Рис. 1. Расчетная схема одного блока
Fig. 1. Modular block design scheme

c — количество этажей здания; G — масса, собранная с перекрытия; h — высота модуля; l_2 — пролет рамы модуля; I_2 — момент инерции ригеля.

Для определения усилий от пульсационного и сейсмического воздействий справедливо использовать консольную схему сооружения с массами, собранными в уровне перекрытий. Тогда инерционные силы от пульсации ветра рассчитываются так:

$$w_i^p = m \cdot \xi_i \cdot \psi_i \cdot y_i, \quad (2)$$

где m — масса сооружения на уровне z , отнесенная к площади поверхности, к которой приложена ветровая нагрузка; ξ_i — коэффициент динамичности, вычисленный для периода собственных колебаний i -й формы, определяется согласно СП 20.13330.2016; ψ_i — коэффициент, определяемый посредством разделения сооружения на r участков, в пределах которых ветровая нагрузка принимается постоянной; y_i — горизонтальное перемещение сооружения на уровне z по i -й форме собственных колебаний:

$$y_j = \frac{(2 \cdot c - 2 \cdot j + 1) \cdot G \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h} \right); \quad (3)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^c y_j, \quad (4)$$

где j — порядковый номер яруса снизу вверх.

$$\psi_i = \frac{\sum_{k=1}^r y_{ki} \cdot w_{pk}}{\sum_{k=1}^r y_{ki}^2 \cdot M_k}, \quad (5)$$

где y_{ki} — горизонтальное перемещение центра k -го участка при i -й форме колебаний, принимаются равными y_j по соответствующим ярусам; w_{pk} — равнодействующая пульсационной составляющей ветровой нагрузки на k -й участок сооружения:

$$w_{pk} = w_m \cdot \zeta \cdot v \cdot A_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где w_m — средняя составляющая ветровой нагрузки, согласно СП 20.13330.2016; ζ — коэффициент пульсации давления ветра, согласно СП 20.13330.2016; v — коэффициент пространственной корреляции ветрового давления, согласно СП 20.13330.2016; $A_{\text{тр}}$ — грузовая площадь ветрового давления.

При установлении частот собственных колебаний системы массы модульного здания сосредоточены в уровне перекрытия, поэтому расчетным k -м участком удобно считать половину одного блок-модуля. Полученные по формуле (2) инерционные силы стоит прикладывать в угловых точках блок-модуля. При этом грузовая площадь $A_{\text{тр}}$ равна четверти обдуваемой поверхности одного модуля (рис. 2).

Сейсмическая нагрузка для i -й формы колебаний:

$$S_{0ik}^j = m_k^j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_{\psi} \cdot \eta_{ik}^j, \quad (7)$$

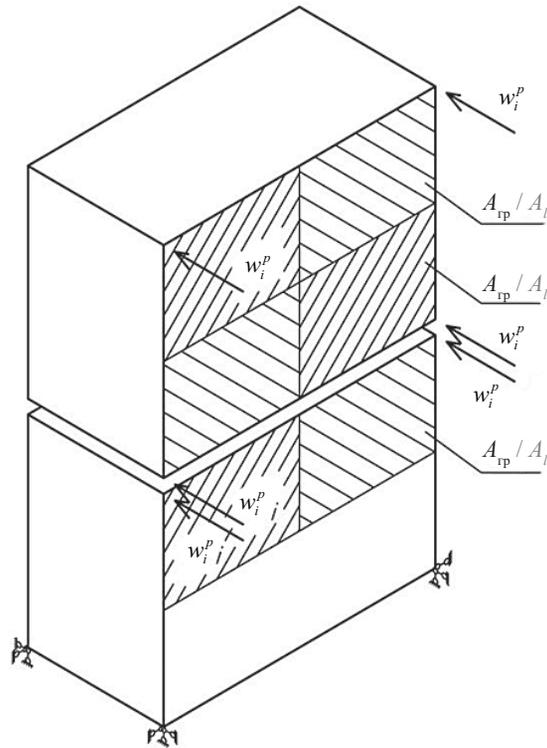


Рис. 2. Грузовые площади к определению инерционных сил
Fig. 2. Load areas for inertial forces

где m_k^j — масса здания, отнесенная к точке k ; A — значение ускорения в зависимости от расчетной сейсмичности согласно СП 14.13330.2018; β_i — коэффициент динамичности, зависящий от категории грунта и периода собственных колебаний, согласно СП 14.13330.2018; K_{ψ} — коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии, согласно СП 14.13330.2018; η_{ik}^j — коэффициент, зависящий от формы колебаний здания или сооружения по i -й форме, от узловой точки приложения нагрузки и направления сейсмического воздействия, согласно СП 14.13330.2018.

В результате вычислений образуется набор инерционных сил $P_j = w_i^p$ от пульсации или $P_j = S_{0ik}^j$ от сейсмического воздействия, приложенных в уровне перекрытий (рис. 3). Дальнейшее определение усилий в элементах одного модуля с учетом возможного расположения в плане нескольких модулей производится по следующим формулам:

$$M_{1j} = M_{2j} = M_{3j} = M_{4j} = \sum_j^c \frac{P_j \cdot h}{4 \cdot a}; \quad (8)$$

$$M_{5j} = M_{6j} = 0; \quad (9)$$

$$N_j = -\sum_j^c \frac{2 \cdot (M_{2,c-j} + M_{2,c-1-j})}{l}, \quad (10)$$

где $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ — изгибающие моменты в соответствующих расчетных сечениях (рис. 5); j — порядковый номер блока по высоте (снизу вверх);

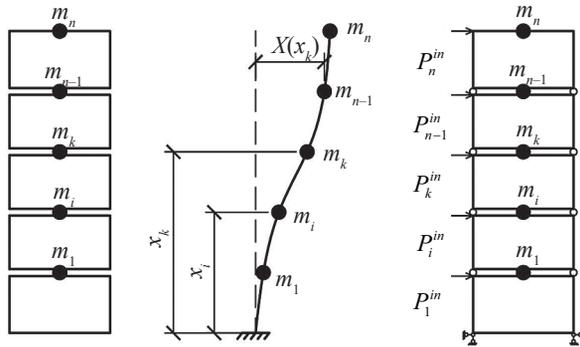


Рис. 3. Схема действия инерционных сил
Fig. 3. Scheme of inertial forces action

c — количество этажей; a — количество блоков в плане в направлении действия нагрузки; N_j — максимальная продольная сила в стойке нижнего модуля; l — пролет модуля в направлении действия нагрузки.

Аналитическое определение усилий является менее трудоемким, чем численное с помощью МКЭ, так как не требует составления расчетной схемы в ПК. Особенно важно это при вариантном проектировании, так как при изменении параметров здания или воздействий в расчетных комплексах приходится значительно изменять схему. Для еще большего упрощения вычислений написана программа Modular. Вычисление усилий с ее помощью занимает пару минут, поэтому она служит удобным инструментом для поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

Программа Modular написана на языке `C#` и зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2019666107 от 04.12.2019). Интерфейс программы (рис. 4) состоит из четырех окон: ввод исходных данных; результаты расчета в на-

правлении Y ; результаты расчета в направлении X ; расчетные сочетания усилий по двум направлениям.

Необходимые исходные данные для расчета:

- генеральные размеры модульного блока (ширина, длина, высота);
- количество модулей по трем направлениям, из которых состоит здание;
- моменты инерции стоек и ригелей;
- нагрузка от собственного веса на нижнюю и верхнюю горизонтальные рамы.

При задании этих сведений будут определены первые частоты собственных колебаний в двух направлениях и усилия от собственного веса. Для установления усилий от других воздействий необходимо ввести дополнительную информацию:

- снеговая и полезная нагрузки;
- ветровой район и тип местности;
- сейсмичность и тип грунта площадки.

Результатом работы программы являются:

- частота и период собственных колебаний по первой форме;
- параметры для определения пульсационного ветрового воздействия (коэффициенты пульсации, динамичности и пространственной корреляции);
- инерционные силы от пульсации в уровне каждого перекрытия;
- параметры для установления сейсмического воздействия (коэффициент динамичности) и инерционные силы от сейсмике в уровне перекрытий;
- изгибающие моменты и продольные силы от действующих нагрузок (собственный вес, снеговая и полезная, статическая составляющая ветра, пульсация, сейсмика).

Все результаты определяются в двух направлениях (продольном и поперечном). Усилия вычисляются для каждого модульного блока по высоте в ше-

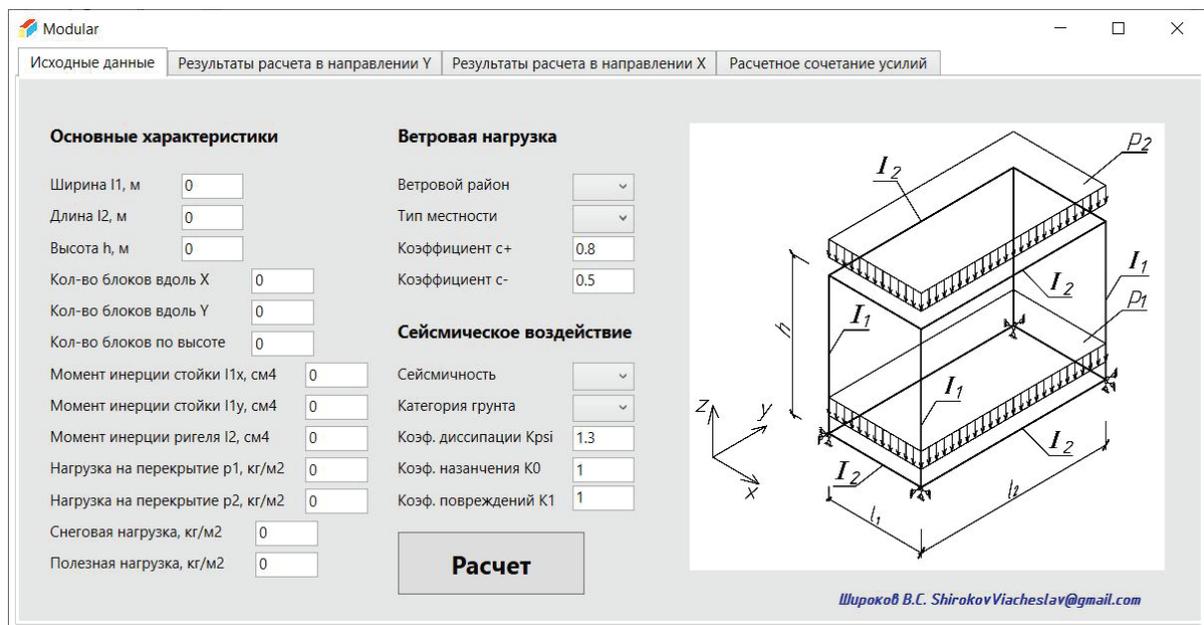


Рис. 4. Окно ввода исходных данных в Modular
Fig. 4. Input data window in Modular

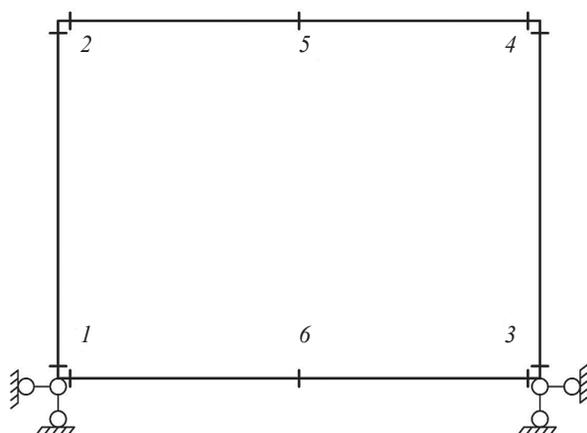


Рис. 5. Расчетные сечения

Fig. 5. Design cross sections

сти расчетных сечениях вертикальной рамы (рис. 5). В последнем окне формируются суммарные усилия по расчетным сечениям согласно сочетаниям нагрузок по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Ввод данных и получение результатов расчета в Modular занимает пару минут, что намного быстрее составления схемы в расчетном комплексе. При этом пользователь получает не только конечные результаты в виде усилий, но и промежуточные характеристики (частоту, коэффициенты динамичности, инерционные нагрузки и т.п.), что удобно для изучения модульных зданий и влияния их параметров на силовую работу. Таким образом, программа удобна для качественной оценки проекта, проведе-

ния предварительных и вариантных расчетов и исследований конструкций модульных зданий, однако при проектировании следует использовать сертифицированные расчетные комплексы, использующие метод конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность определения усилий аналитическим методом в сравнении с МКЭ проверена на примере модульного здания с параметрами, указанными в работе [20]. Колонны и балки выполнены из квадратных труб 150 × 8, моменты инерций $I_1 = I_2 = 1411 \text{ см}^4$. Размеры модуля приняты 3 × 6 × 2,7(н) м, количество блоков в плане: 2 по ширине здания и 3 по длине. Собственный вес перекрытий принят $g = 100 \text{ кг/м}^2$, полезная нагрузка $p = 150 \text{ кг/м}^2$. Ветровые нагрузки соответствуют IV району, тип местности А, снеговой район — V. Сейсмичность принята 8 баллов, тип грунта II.

Для расчета здания методом конечных элементов использовалась Лира-САПР 2016. Расчетная модель представляла собой пространственную стержневую схему. Элементам назначен универсальный пространственный тип (КЭ 10). Колонны и ригели разбивались на 8 конечных элементов для получения более точных картин деформации. Горизонтальная жесткость перекрытий моделировалась стержнями, имеющими тип конечного элемента пространственной фермы (КЭ 4). Сопряжение блок-модулей друг с другом моделировалось объединением перемещений угловых точек по трем

Усилия от вертикальных нагрузок

Internal forces by vertical loads

Нагрузка Load	Усилие Internal force	МКЭ / FEM			Аналитика / Analytics			Δ, %		
		1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey	1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey	1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey
Собственный вес Dead load	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90	0,0	0,0	0,0
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,0	0,0	0,0
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	0,0	0,0	0,0
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	0,0	0,0	0,0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	-4,50	-13,49	-22,49	-4,50	-13,50	-22,50	0,0	0,1	0,0
Снеговая Snow	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	-0,99	-0,99	-0,99	-1,01	-1,01	-1,01	2,0	2,0	2,0
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	8,75	8,75	8,75	8,77	8,77	8,77	0,2	0,2	0,2
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	8,11	8,11	8,11	8,10	8,10	8,10	-0,1	-0,1	-0,1
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	-11,24	-11,24	-11,24	-11,25	-11,25	-11,25	0,1	0,1	0,1
Полезная Imposed load	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	-5,25	-5,25	-5,25	-5,26	-5,26	-5,26	0,2	0,2	0,2
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0,59	0,59	0,59	0,61	0,61	0,61	3,4	3,4	3,4
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	0,0	0,0	0,0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	0	6,75	13,49	0	6,75	13,50	0	0,0	0,1

линейным направлениям. Вертикальные нагрузки прикладывались на продольные ригели в виде погонной, равномерно распределенной по длине элемента.

Сравнение результатов вычисления усилий произведено для одно-, двух-, трех- и четырехэтажного зданий. Для вертикальных нагрузок усилия определены во всех шести расчетных сечениях. Результаты вычисления усилий от вертикальных нагрузок приведены в таблице. Результаты (табл.) демонстрируют высокую сходимость аналитического и численного методов для вертикальных нагрузок. Также согласно таблице видно, что погрешность вычисления усилий не зависит от количества этажей, поэтому приведены результаты только для одно-, двух- и трехэтажных зданий.

Анализ усилий от поперечных воздействий удобнее проводить с помощью графиков. Наибольшие изгибающие моменты и продольные силы от поперечной нагрузки возникают в опорном сечении крайней стойки нижнего модуля. На рис. 6 показаны изменения изгибающих моментов в расчетном сечении № 1 нижнего модуля; на рис. 7 — изменения продольных сил в расчетном сечении № 1 нижнего модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Усилия от вертикальных нагрузок (собственный вес, полезная и снеговая), вычисленные аналитически и методом конечных элементов, показывают высокую сходимость, погрешность не превышает 3,4 % (табл.). Погрешность вычисления уси-

лий от поперечных нагрузок более высокая, чем от вертикальных, что связано с определением инерционных сил от пульсации и сеймики. Наибольшее расхождение наблюдается для усилий от пульсации ветра одно- и двухэтажных зданий: расхождение изгибающих моментов составляет 30 % (рис. 6). В первую очередь это связано с определением коэффициента ψ (формула (5)), точность вычисления которого зависит от количества масс по высоте сооружения. При увеличении этажности погрешность определения усилий от пульсации уменьшается, для четырехэтажного здания составляет 11,1 % для изгибающего момента и 3,2 % для продольной силы. При этом погрешность от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих — 4,2–16,6 % для моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность установления усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

Таким образом, предложенный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий с вычислением частоты собственных колебаний по формуле (1) имеет достаточную сходимость для предварительных инженерных расчетов и качественной оценки конструктивного решения модульного здания. Главные достоинства метода — более высокая скорость вычислений и прямая связь между усилиями в элементах модулей и их геометрическими характеристиками. Поэтому с точки зрения проведения исследования напряженно-де-

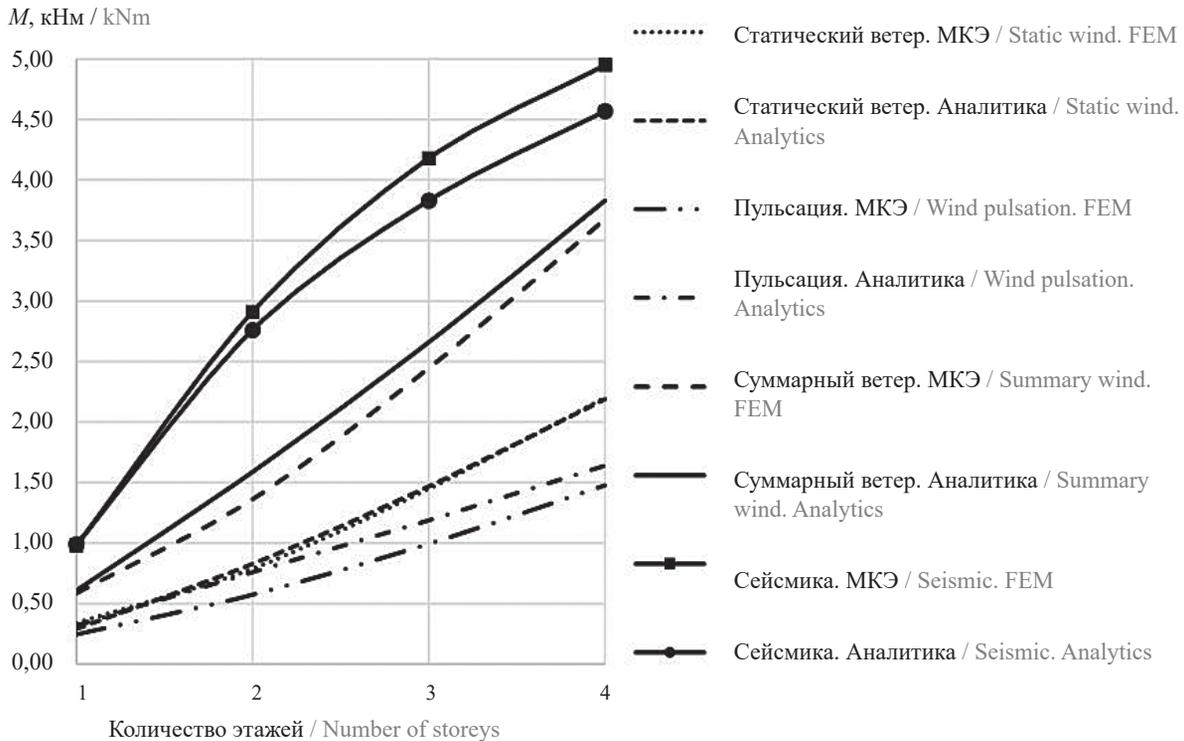


Рис. 6. Изменение опорных моментов в зависимости от этажности здания

Fig. 6. Change of bearing moments depending on the number of storeys of the building

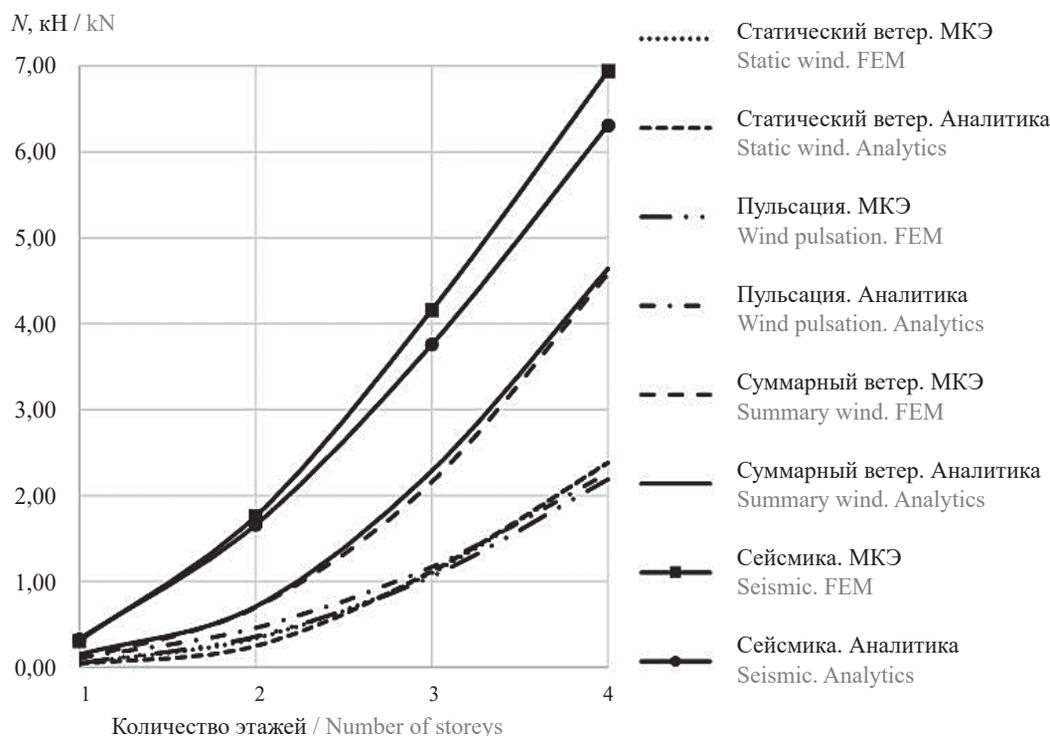


Рис. 7. Изменение продольных сил в зависимости от этажности здания

Fig. 7. Change in longitudinal forces depending on the number of storeys of the building

формированного состояния модульных зданий аналитический метод удобнее, чем МКЭ.

На основе выполненной работы можно сделать следующие выводы.

- Представленный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий показывает хорошую сходимость результатов с МКЭ. На конкретном примере показано, что расхождение в определении усилий от вертикальных нагрузок практически отсутствует. Расхождение от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих составляет 4,2–16,6 % для моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность

определения усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

- Метод удобен для применения на стадии качественной оценки проектных решений, вариантных расчетов и поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

- Программа Modular служит удобным инструментом для расчета модульных зданий с точки зрения изучения их силовой работы. Однако при проектировании следует использовать сертифицированные расчетные комплексы, использующие метод конечных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абрамян С.Г., Илиев А.Б.* Особенности технологий быстровозводимых зданий и сооружений // Научные исследования высшей школы в области строительства и архитектуры : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 22–27. EDN YQHWNF.

2. *Захарова М.В., Пономарев А.Б.* Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13. EDNYLXSPN.

3. *Захарова А.С.* Обустройство месторождений нефтегазовой промышленности и их инфраструкту-

ра // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11(71). С. 329–338. EDN NWFFYL.

4. *Иванов А.А.* Анализ рынка блочно-модульных зданий из металлоконструкций для нефтегазовой сферы // Начало в науке : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов. 2017. С. 219–222. EDN YJESBN.

5. *Lawson R., Ogden R., Pedreschi R., Grubb P., Popo-Ola S.* Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction // The Structural engineer. 2005. Vol. 83. Pp. 28–35.

6. *Lawson R.M., Richards J.* Modular design for high-rise buildings // Proceedings of the Institu-

tion of Civil Engineers — Structures and Buildings. 2010. Vol. 163. Issue 3. Pp. 151–164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151

7. *Thai H.-T., Ngo T., Uy B.* A review on modular construction for high-rise buildings // Structures. 2020. Vol. 28. Pp. 1265–1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070

8. *Ferdous W., Bai Y., Ngo T.D., Manalo A., Mendis P.* New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings : a state-of-the-art review // Engineering Structures. 2019. Vol. 183. Pp. 883–893. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.061

9. Innovation in modular building construction. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05

10. *Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S.* Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220

11. *Liew J.Y.R., Chua Y.S., Dai Z.* Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Structures. 2019. Vol. 21. Pp. 135–149. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.02.010

12. *Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H.* Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings // Journal of Earthquake Engineering. 2008. Vol. 13. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.1080/13632460802212576

13. *Zhao F., Yu Y., Lin S., Ding F.* Evaluation of the working mechanisms and simplified models of endplate-type inter-module connections // Structures. 2021. Vol. 32. Pp. 562–577. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.034

14. *Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K.* Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. 2020. Vol. 213. P. 110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628

15. *Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K.* Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections // Engineering Structures. 2021. Vol. 236. P. 112103. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112103

16. *Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K.* Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study // 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures. 2018.

17. *Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K.* Structural Response of Modular Buildings : an Overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.job.2017.12.008

18. *Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovejv A.V.* Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 655–661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218

19. *Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu.* Analytic method of structural analysis of modular buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. Issue 1. P. 012148. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012148

20. *Gatheeshgar P., Parker S., Askew K., Poologanathan K., Navaratnam S., McIntosh A.* Flexural behaviour and design of modular construction optimised beams // Structures. 2021. Vol. 32. Pp. 1048–1068. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.009

Поступила в редакцию 20 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 18 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вячеслав Сергеевич Широков** — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Татьяна Александровна Белаш — доктор технических наук, профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов; НИЦ «Строительство»; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; РИНЦ ID: 66498; Belashta@mail.ru;

Татьяна Евгеньевна Гордеева — кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 301105; nfyuj@rambler.ru.

Вклад авторов:

Широков В.С. — идея, сбор и обработка материала, разработка метода, получение результатов, написание статьи, итоговые выводы.

Белаш Т.А. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Гордеева Т.Е. — научное редактирование текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Abramyan S.G., Iliev A.B. Features of technologies of prefabricated buildings and structures. *Scientific research of higher school in the field of construction and architecture : the international scientific-practical conference*. 2018; 22-27. EDN YQHWNF. (rus.).
2. Zakharova M.V., Ponomarev A.B. Experience in constructing buildings and structures using modular technology. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017; 8(1):148-155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13.EDN YLXSPN. (rus.).
3. Zaharova A.S. Arrangement of oil and gas fields and their infrastructure. *Engineering Journal of Don*. 2020; 11(71):329-338. EDN NWFFYL. (rus.).
4. Ivanov A.A. Analysis of the market for block-modular buildings from metal structures for the oil and gas sector. *Beginning in science : materials of the IV international scientific-practical conference of school-children, students, undergraduates and graduate students*. 2017; 219-222. EDN YJEBSN. (rus.).
5. Lawson R., Ogden R., Pedreschi R., Grubb P., Popo-Ola S. Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction. *The Structural engineer*. 2005; 83:28-35.
6. Lawson R.M., Richards J. Modular design for high-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2010; 163(3):151-164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151
7. Thai H.-T., Ngo T., Uy B. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020; 28:1265-1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070
8. Ferdous W., Bai Y., Ngo T.D., Manalo A., Mendis P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings : a state-of-the-art review. *Engineering Structures*. 2019; 183:883-893. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.061
9. *Innovation in modular building construction*. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05
10. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018*. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220
11. Liew J.Y.R., Chua Y.S., Dai Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Structures*. 2019; 21:135-149. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.02.010
12. Annan C.D., Youssef M.A., El Nagggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2008; 13(1):1-21. DOI: 10.1080/13632460802212576
13. Zhao F., Yu Y., Lin S., Ding F. Evaluation of the working mechanisms and simplified models of endplate-type inter-module connections. *Structures*. 2021; 32:562-577. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.034
14. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020; 213:110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
15. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021; 236:112103. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112103
16. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study. *13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures*. 2018.
17. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings : an overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.job.2017.12.008
18. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovejv A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016; 153:655-661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
19. Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 775(1):012148. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012148
20. Gatheeshgar P., Parker S., Askew K., Pologanathan K., Navaratnam S., McIntosh A. Flexural behaviour and design of modular construction optimised beams. *Structures*. 2021; 32:1048-1068. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.009

Received August 20, 2023.

Adopted in revised form on December 6, 2023.

Approved for publication on January 18, 2024.

BIONOTES: **Viacheslav S. Shirokov** — senior lecturer at the Department of Metal and Wooden Structures; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Tatyana A. Belash — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials; **Research Center “Construction”**; 6 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 66498; Belashta@mail.ru;

Tatyana E. Gordeeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Construction and Technology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 301105; nfyuj@rambler.ru.

Contribution of the authors:

Viacheslav S. Shirokov — conceptualization, data gathering and processing, method development, results generation, writing of the article, conclusions.

Tatyana A. Belash — scientific supervising, scientific editing of the text, conclusions.

Tatyana E. Gordeeva — scientific editing of the text, conclusions.

The authors declares that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074:531.391.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.377-386

Формулы для двухсторонней оценки основной частоты колебаний решетчатой фермы

Михаил Николаевич Кирсанов*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из ключевых проблем колебаний строительных конструкций является определение основной частоты собственных колебаний. Аналитические решения здесь редки и, как правило, базируются на приближенных оценках первой частоты сверху (метод Рэлея) или снизу (оценка Донкерлея). Чаще всего задача о собственных колебаниях решается численно с помощью метода конечных элементов с применением специализированных пакетов. Цель исследования — вывести аналитические оценки зависимости первой частоты колебаний фермы решетчатого типа от числа панелей, геометрических характеристик конструкции и параметров упругих свойств материала.

Материалы и методы. Плоская статически определимая решетка опирается основанием на стойки. Угловая опора — неподвижный шарнир. Расчет усилий в элементах конструкции производится методом вырезания узлов с использованием стандартных операторов системы символьной математики Maple. Жесткость фермы находится по формуле Максвелла – Мора. Масса фермы распределена равномерно по ее узлам. Колебания масс происходят по вертикали. Обобщением серии решений для ферм с последовательно растущим порядком на произвольное число панелей искомые формулы выводятся методом индукции.

Результаты. Замечен случай кинематической изменяемости предложенной схемы фермы. Получены формулы для первой частоты методом Донкерлея и Рэлея. Два аналитических решения сравниваются с численным, полученным для всего спектра частот. Обнаружены спектральные константы и области резонансной безопасности в спектрах семейства регулярных ферм.

Выводы. Двухсторонний метод оценки первой частоты применим для решения задач о регулярных конструкциях, где конечная формула включает в качестве параметра порядок регулярности. Для рассматриваемой конструкции погрешность метода Рэлея сопоставима с погрешностью метода Донкерлея.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кинематическая изменяемость, плоская ферма, аналитическое решение, собственная частота, Maple, метод Донкерлея, метод Рэлея, спектральные константы

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РНФ (проект № 22-21-00473).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кирсанов М.Н. Формулы для двухсторонней оценки основной частоты колебаний решетчатой фермы // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 377–386. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.377-386

Автор, ответственный за переписку: Михаил Николаевич Кирсанов, c216@ya.ru.

Formula for two-sided estimation of the fundamental frequency of oscillations of a lattice truss

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

ABSTRACT

Introduction. One of the main tasks of the theory of oscillations of building structures is the determination of the fundamental frequency of natural oscillations. Analytical solutions are rare here and, as a rule, are based on approximate estimates of the first frequency from above (Rayleigh’s method) or from below (Dunkerley’s estimate). Most often, the problem of natural oscillations is solved numerically by the finite element method using specialized packages. In this paper, the task is to derive analytical estimates of the dependence of the first oscillation frequency of a lattice truss on the number of panels, the geometric characteristics of the structure, and the parameters of the elastic properties of the material.

Materials and methods. A flat statically determinable lattice is supported by its base on struts. The angular support is a fixed joint. Calculation of forces in structural elements is performed by cutting out nodes using standard operators of the Maple symbolic mathematics system. The rigidity of the truss is found by the Maxwell – Mohr formula. The mass of the truss is distributed uniformly over its nodes. Mass oscillations occur vertically. By generalizing a series of solutions for trusses with a successively increasing order to an arbitrary number of panels, the desired formulas are derived by induction.

Results. A case of kinematic variability of the proposed truss scheme was noticed. Formulas for the first frequency are obtained by the Dunkerley and Rayleigh method. The two analytical solutions are compared with the numerical solution obtained for the entire frequency spectrum. Spectral constants and resonant safety regions were discovered in the spectra of a family of regular trusses.

Conclusions. The two-sided method for estimating the first frequency is applicable to solving problems on regular constructions, where the final formula includes the order of regularity as a parameter. For the construction under consideration, the error of the Rayleigh method is comparable to the error of the Dunkerley method.

KEYWORDS: external static indeterminacy, planar truss, analytical solution, natural frequency, Maple, Dunkerley method, Rayleigh method, spectral constants

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-21-00473).

FOR CITATION: Kirsanov M.N. Formula for two-sided estimation of the fundamental frequency of oscillations of a lattice truss. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):377-386. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.377-386 (rus.).

Corresponding author: Mikhail N. Kirsanov, C216@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет собственных частот ферм обычно производится численно в специальных инженерных программах, в основе которых лежит метод конечных элементов (МКЭ). Учет демпфирования колебаний при динамических нагрузках и вариантное проектирование ферм с использованием программы «ЛИРА» рассмотрены в работах [1, 2]. Классический МКЭ для решения задач строительной механики использовался в исследовании [3]. Аналитические решения в механике строительных конструкций появились в связи с развитием компьютерных программ символьной математики. Получено уравнение частот для плоской балочной фермы с произвольным числом панелей [4]. Нижняя граница частоты собственных колебаний плоской балочной фермы без нижнего пояса (фермы Финка) найдена в аналитической форме [5]. Формулы для прогиба балочной фермы с решеткой шпренгельного типа с произвольным числом панелей приведены в публикации [6] с использованием системы компьютерной математики Maple. Предложен алгоритм вычисления перемещений в плоских рамных стержневых конструкциях в системе символьных преобразований Wolfram Mathematica [7]. Выполнен аналитический расчет прогиба плоской шпренгельной фермы с произвольным числом панелей от действия равномерно распределенной по поясам нагрузки в системе Maple [8]. Показано, что при определенном числе панелей относительный прогиб имеет минимум. Найдена наклонная асимптота графика зависимости прогиба от числа панелей. Операторы системы Maple использованы в труде [9] для анализа нижней границы первой частоты собственных колебаний плоской шпренгельной фермы. Получена оценка основной частоты колебаний Г-образной пространственной фермы, предназначенной для крепления автомобильных знаков и различных устройств [10]. Замечено, что с увеличением порядка регулярности фермы (числа панелей) погрешность приближенного аналитического решения падает, что делает аналитическое решение особенно выгодным для масштабных конструкций, численный расчет которых всегда требует значительного времени. Также получена картина распределения частотных изолиний, сгущающихся с увеличением частоты колебаний. Проведен расчет основной частоты собственных колебаний статически определимой регулярной плоской фермы с треугольной решеткой и дополнитель-

ными внутренними горизонтальными связями [11]. Итоговая формула для первой частоты, рассчитанная по методу Донкерлея, содержит только две константы, зависящие от числа панелей полиномиальным образом. Проблему расчета регулярных статически определимых плоских и пространственных ферм и их существование, вероятно впервые, поднимали R.G. Hutchinson и N.A. Fleck [12, 13]. Большой вклад в развитие теории и практики расчетов регулярных стержневых конструкций применительно к их оптимизации внес А. Kaveh [14]. Обзор некоторых аналитических решений статики плоских регулярных ферм содержится в работе [15]. В монографии В.В. Галишиной и В.А. Игнатьева [16] рассмотрены теория и методы линейного расчета регулярных стержневых систем. Предложены точные и приближенные методы для расчета таких ферм на устойчивость, прочность и колебания. Напряженно-деформированное состояние и прогибы трехгранной балочной фермы для перекрытий и покрытий общественных и производственных зданий при линейных нагрузках рассчитаны методом конечных элементов [17] применительно к разным районам строительства.

Нижняя граница первой собственной частоты фермы с двумя пролетами с учетом жесткости опор методом индукции получена для произвольного числа панелей [18].

Аналитически и численно исследована собственная частота многопролетных двутавровых составных мостов с линейными вогнутыми сечениями [19]. Численные расчеты выполнены в системе MATLAB и МКЭ. Показано, что разработанная формула позволяет с высокой точностью находить собственную частоту. Средняя и максимальная ошибки составляют 3,5 и 14 % соответственно.

В настоящей работе выводятся формулы для основной частоты собственных колебаний плоской решетки с прямолинейным верхним поясом и шарнирно опертой на подвижные опоры по одной стороне (рис. 1).

Высота фермы $2h$, принято четное число панелей длиной a каждая. Решетка конструкции *сдвоенная*. Длины четырех боковых раскосов $c = \sqrt{a^2 + h^2}$, остальные раскосы имеют длину $2c$. Фактически это многопролетная неразрезная ферма.

Анализируется кинематическая изменяемость фермы и приводятся три алгоритма получения приближенного значения первой собственной частоты колебаний конструкции.

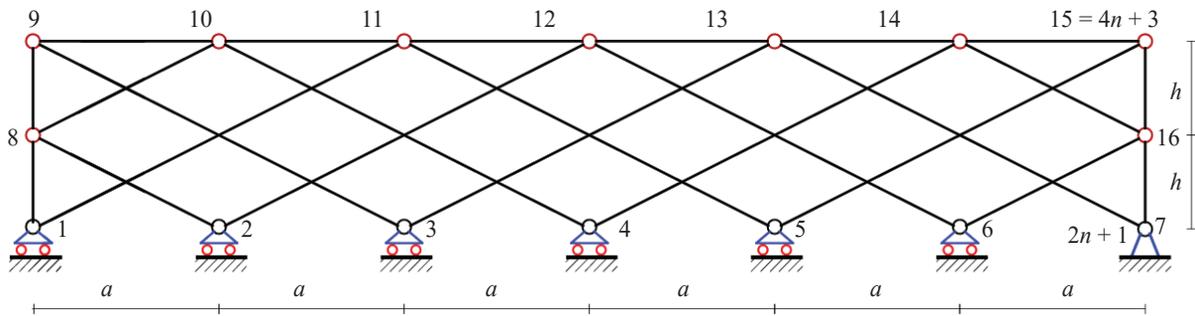


Рис. 1. Схема фермы и нумерация узлов, $n = 3$

Fig. 1. Truss scheme and node numbering, $n = 3$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет усилий в стержнях

Ферма статически определимая. Общее число узлов в ферме $6n + 6$, из которых $K = 4(n + 1)$ — внутренние узлы. Число стержней $\eta = 8(n + 1)$. Масса фермы равномерно распределена по узлам конструкции. Усилия в стержнях фермы определяются в программе на языке компьютерной математики Maple с использованием метода вырезания узлов [20]. Система уравнений равновесия всех узлов записывается в матричном виде. Вектор правой части содержит усилия, приложенные к узлам. Нечетные уравнения системы содержат направляющие косинусы неизвестных усилий и реакций опор в проекции на ось x (горизонтальную), четные — на ось y . Для работы программы необходимо ввести координаты внутренних узлов (рис. 1):

$$\begin{aligned} x_i &= x_{2n+2+i} = a(i-1), y_i = 0; \\ y_{2n+2+i} &= 2h; x_{2n+2} = 0, y_{2n+2} = h; \\ x_{4n+4} &= 2na; y_{4n+4} = h, i = 1; \dots, 2n+1. \end{aligned}$$

Координаты концов опорных стоек, моделирующих подвижную и неподвижную опоры, имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{i+4n+4} &= x_i; y_{i+4n+4} = -h; \\ i &= 1, \dots, 2n+1; \\ x_{6n+6} &= x_{2n+1} + a; y_{6n+6} = 0. \end{aligned}$$

Элементами матрицы системы уравнений равновесия являются направляющие косинусов неизвестных усилий в стержнях. Значения направляющих косинусов вычисляются по данным о координатах узлов и порядку соединения стержней в узлах.

Номера узлов по концам стержней записываются в ориентированные списки $\Phi_i, i = 1, \dots, \eta$. Восходящие и нисходящие раскосы длиной $2a$ кодируются, например, списками вида:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= [i, i + 2n + 4]; \\ \Phi_{i+2n+4} &= [i + 2, i + 2n + 2]; \\ i &= 1, \dots, 2n - 1. \end{aligned}$$

Система уравнений равновесия записывается в матричном виде: $\mathbf{GS} = \mathbf{T}$, где \mathbf{S} — вектор, содер-

жащий неизвестные усилия и реакции опор. Вектор внешних нагрузок \mathbf{T} задается длиной η . Нагрузки, направленные горизонтально и приложенные к узлу i , записываются в элементы T_{2i-1} с нечетными номерами, вертикальные — в элементы T_{2i} на четных строках. Решение матричного уравнения в символьной форме получается методом обратной матрицы с помощью операторов системы Maple: $\mathbf{S} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{T}$ [20].

Кинематическая изменяемость

Пробные аналитические вычисления усилий в ферме с произвольной нагрузкой для различного числа панелей показали, что для фермы четных порядков $n = 2k, k = 1, 2, \dots$ определитель матрицы \mathbf{G} системы уравнений равновесия узлов вырождается. Расчеты в численной форме не всегда улавливают вырождение матриц, скрывая это за неизбежными погрешностями вычислений. Этот факт свидетельствует о кинематической изменяемости конструкции [21]. Подтверждением кинематического вырождения служит картина возможных скоростей, полученная методами кинематики (рис. 2). Основой метода получения картины распределения скоростей является векторное уравнение связи скоростей точек одного отрезка. Решетка условно разбивается на шарнирные двухзвенники. По заданным скоростям концов двухзвенника однозначно вычисляется скорость его среднего шарнира. Такая процедура повторяется для всех узлов конструкции. Если исследуемая шарнирно-стержневая система изменяема, то процедура последовательного расчета скоростей приводит в конце к кинематическому противоречию. Например, может получиться, что скорость какого-то подвижного опорного шарнира окажется отличной от нуля, или скорость одного из шарниров будет разной при различной последовательности вычисления скоростей узлов.

Получены следующие компоненты возможных скоростей узлов:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= [-4v, 0]; \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_6 = [-3v, 0]; \\ \mathbf{v}_3 &= \mathbf{v}_7 = \mathbf{v}_{11} = [-2v, 0]; \\ \mathbf{v}_4 &= \mathbf{v}_{12} = [-v, 0]; \\ \mathbf{v}_8 &= \mathbf{v}_{10} = \mathbf{v}' = [-2v, -av/h]; \\ \mathbf{v}_9 &= \mathbf{u} = [-2v, -2av/h]. \end{aligned}$$

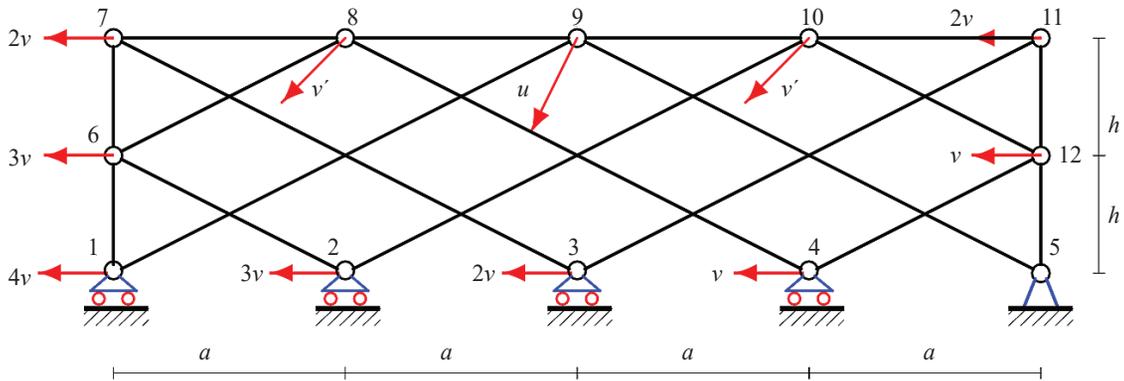


Рис. 2. Возможные скорости узлов изменяемой фермы, $n = 2$

Fig. 2. Virtual velocities of nodes of a variable truss, $n = 2$

Контроль правильности нахождения скоростей узлов — кинематическая теорема о равенстве проекций скоростей концов отрезка на этот отрезок. Схемы статически определимых плоских ферм регулярного типа, допускающих кинематическую изменяемость при определенном числе панелей, приведены в справочнике [22].

Таким образом, для того чтобы избежать случаев кинематической изменяемости, все расчеты в рассматриваемой ферме необходимо проводить только для нечетного числа панелей $n = 2k - 1, k = 1, 2, \dots$, т.е. для случаев кинематически неизменяемых ферм.

Метод Донкерлея

Расчет первой (нижней) частоты собственных колебаний механических систем с числом свободы больше четырех возможен только в численной форме. Если ставить задачу получения формулы зависимости частоты колебаний регулярной структуры (фермы) от числа панелей, необходим какой-то приближенный метод. Наиболее распространены на практике методы оценки частоты снизу по Донкерлею [23] и сверху по Рэлею [24]. Приближенная оценка первой частоты колебаний по Донкерлею имеет вид:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2}, \tag{1}$$

где K — число степеней свободы фермы; ω_p — рассчитанные для каждой массы отдельно парциальные частоты. Предполагается, что массы имеют только вертикальные скорости. В таком случае число степеней свободы равно числу узлов. Уравнение движения отдельной массы в узле p :

$$m\ddot{y}_p + D_p y_p = 0; p = 1, 2, \dots, K. \tag{2}$$

Расчет коэффициента жесткости D_p обратного к коэффициенту податливости, выполняется по формуле Максвелла – Мора. Суммирование проводится по всем стержням фермы, включая стержни, моделирующие опоры. Длина опорных стоек принята равной h :

$$\delta_p = \frac{1}{D_p} = \sum_{i=1}^n (S_i^{(p)})^2 \frac{l_i}{EF}. \tag{3}$$

Из выражения (2) при гармонических колебаниях $y_p = A_p \sin(\omega t + \varphi)$ следует $\omega_p = \sqrt{D_p/m}$. Отсюда получается формула для частоты:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = m \Delta_k. \tag{4}$$

Для вывода зависимости частоты от числа панелей используется метод индукции. Расчеты дают следующую последовательность:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{c^3 + 18h^3}{h^2 EF}; \\ \Delta_2 &= \frac{16a^3 + 17c^3 + 52h^3}{h^2 EF}; \\ \Delta_3 &= \frac{48a^3 + 49c^3 + 102h^3}{h^2 EF}; \\ \Delta_4 &= \frac{96a^3 + 97c^3 + 168h^3}{h^2 EF}; \\ \Delta_5 &= \frac{160a^3 + 161c^3 + 250h^3}{h^2 EF}, \dots \end{aligned}$$

В системе Maple можно найти общий член этой последовательности:

$$\Delta_k = \frac{C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3}{h^2 EF}, \tag{5}$$

где коэффициенты имеют вид:

$$\begin{aligned} C_1 &= 8k(k-1); \\ C_2 &= 8k(k-1)+1; \\ C_3 &= 2k(4k+5). \end{aligned}$$

В итоге:

$$\begin{aligned} \omega_D &= \\ &= h \sqrt{\frac{EF}{m(8k(k-1)a^3 + (8k(k-1)+1)c^3 + 2(4k+5)h^3)}}. \end{aligned} \tag{6}$$

Метод Рэлея

Расчет оценки первой частоты сверху основан на законе сохранения энергии и сводится к вычислению величины [24]:

$$\omega_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^K \ddot{u}_i}{\sum_{i=1}^K m \ddot{u}_i^2}, \tag{7}$$

где \tilde{u}_i — смещение узла i от действия равномерно распределенных по всем узлам единичных вертикальных сил. Определяется по формуле:

$$\tilde{u}_i = \frac{\sum_{\alpha=1}^h S_{\alpha}^{(P)} S_{\alpha}^{(i)} I_{\alpha}}{EF}. \quad (8)$$

Введены обозначения: $S_{\alpha}^{(P)}$ — усилие в стержне $\alpha = 1, \dots, h$ от действия внешней вертикальной нагрузки $P = 1$, равномерно распределенной по всем узлам; $S_{\alpha}^{(i)}$ — усилие в стержне от одной (безразмерной) нагрузки, приложенной вертикально к ферме в узле с номером i .

Выражения для сумм $\sum_{i=1}^K \tilde{u}_i$ и $\sum_{i=1}^K \tilde{u}_i^2$ рассчитываются отдельно.

Расчет смещений узлов для ферм разного порядка дает общий вид решения:

$$\sum_{i=1}^K \tilde{u}_i = \frac{C_a a^3 + C_c c^3 + C_h h^3}{h^2 EF}, \quad (9)$$

где коэффициенты C_a, C_c, C_h получаютя обобщением следующих последовательностей:

$$\begin{aligned} k = 1: \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i &= \frac{c^3 + 52h^3}{h^2 EF}; \\ k = 2: \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i &= \frac{52a^3 + 19c^3 + 44h^3}{h^2 EF}; \\ k = 3: \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i &= \frac{52a^3 + 21c^3 + 96h^3}{h^2 EF}; \\ k = 4: \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i &= \frac{104a^3 + 39c^3 + 88h^3}{h^2 EF}; \\ k = 5: \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i &= \frac{104a^3 + 41c^3 + 140h^3}{h^2 EF}, \dots \end{aligned}$$

В системе Maple можно найти общие члены последовательностей коэффициентов:

$$\begin{aligned} C_a &= 13(-1)^k - 1 + 2k; \\ C_c &= 10k - 5 + 4(-1)^k; \\ C_h &= 22k + 15 - 15(-1)^k. \end{aligned}$$

Аналогично находятся и суммы квадратов смещений:

$$\begin{aligned} C_{cc} &= 8k^3 + 4(2(-1)^k - 3)k^2 + \\ &+ (22 - 8(-1)^k)k + 8(-1)^k - 9; \\ C_{ac} &= \frac{68k^3 + (195(-1)^k - 102)k^2}{3} + \\ &+ \frac{5(122 - 39(-1)^k)k + 288((-1)^k - 1)}{3}; \\ C_{ch} &= 8k^3 + (26 - 30(-1)^k)k^2 + \\ &+ (137 - 77(-1)^k)k - 89(-1)^k + 87; \\ C_{ah} &= \frac{80k^3 + 36(2 - (-1)^k)k^2}{3} + \\ &+ \frac{4(10 + 87(-1)^k)k + 60(1 - (-1)^k)}{3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{ch} &= 2(8k^3 + (7 - 11(-1)^k)k^2 + \\ &+ (6 + 18(-1)^k)k - (-1)^k - 1); \\ C_{ac} &= \frac{2(40k^3 + 6(13(-1)^k - 10)k^2)}{3} + \\ &+ \frac{2(2(97 - 39(-1)^k)k + 87((-1)^k - 1))}{3}. \end{aligned}$$

Знаменатель имеет более сложную форму:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K m \tilde{u}_k^2 &= m \times \\ &\times \frac{C_{aa} a^6 + C_{cc} c^6 + C_{hh} h^6 + C_{ah} a^3 h^3 + C_{ac} a^3 c^3 + C_{ch} c^3 h^3}{h^4 E^2 F^2}. \end{aligned}$$

Верхняя оценка основной частоты фермы для произвольного числа панелей по формуле Рэлея имеет вид:

$$\omega_R = h \sqrt{\frac{EF(C_a a^3 + C_c c^3 + C_h h^3)}{m(C_{aa} a^6 + C_{cc} c^6 + C_{hh} h^6 + C_{ah} a^3 h^3 + C_{ac} a^3 c^3 + C_{ch} c^3 h^3)}}. \quad (10)$$

Упрощенный метод Донкерлея

В работе [25] предложен вариант метода Донкерлея для расчета первой собственной частоты. В этом методе сумма в формуле (1) вычисляется по теореме о среднем:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = \frac{mK \delta^{\max}}{2}, \quad (11)$$

где δ^{\max} — максимальное значение ω_p^{-2} , вычисленное для некоторого узла, имеющего максимальный прогиб от отдельной вертикальной силы, приложенной к этому узлу. Более точно:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = mK \frac{\delta^{\max} + \delta^{\min}}{2}.$$

В большинстве случаев $\delta^{\min} = 0$, так как узел, в котором прогиб минимальный, обычно приходится на опору. Если для численного расчета сложность вычислений по формулам (4) и (11) приблизительно одинаковая, то для аналитических преобразований разность в трудоемкости весьма значительная. Решение по упрощенному методу дает выражение вида (5):

$$\Delta_k = \frac{C_4 a^3 + C_5 c^3 + C_6 h^3}{h^2 EF}, \quad (12)$$

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} C_4 &= 4k(2k + (-1)^k - 1); \\ C_5 &= 4k(2k - 1); C_6 = 4k(2k + 3). \end{aligned} \quad (13)$$

Как и в выражении (6) полученные коэффициенты также квадратичные. Упрощенное решение задачи о первой частоте имеет вид:

$$\begin{aligned} \omega^* &= \\ &= h \sqrt{\frac{EF}{4mk(2k + (-1)^k - 1)a^3 + (2k - 1)c^3 + (2k + 3)h^3}}. \end{aligned} \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим в качестве примера регулярные фермы с площадью поперечного сечения стержней решетки и опорных стержней $F = 9 \text{ см}^2$. Модуль упругости стали $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, массы в узлах $m = 100 \text{ кг}$, размеры $a = 4 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$. Три кривые на рис. 3 соответствуют численному решению ω_1 , методу Донкерлея по формуле (6), методу Рэлея (10) и приближенному методу Донкерлея (14). Численное решение ω_1 — это минимальная частота всего спектра частот фермы, полученная в пакете LinearAlgebra системы Maple. Расчет частоты в численной форме достаточно быстрый и реализуется в той же программе, что использована для получения аналитических решений в символьной форме.

Численное решение ограничено снизу и сверху аналитическими оценками (6), (10) и (14). Погрешность этих оценок по Рэлею и Донкерлею приблизительно одинаковая, поэтому для получения приближенного решения можно брать их полусумму. На практике, безусловно, удобнее пользоваться короткими и весьма близкими решениями (6) и (14), принимая что аналитические решения отличаются от численного не более чем на 30 %. Сложность исходного решения (6) по Донкерлею и приближенного (14) одинаковая. Достоинством решения (14) является простота его вывода, свободная от необходимости находить закономерности суммы обратных квадратов частот. Недостаток приближенного решения (14) — некоторая неопределенность выбора узла с максимальным прогибом. Для балочных ферм — это, как правило, середина пролета. В рассматриваемой многопролетной ферме с двойными раскосами, передающими усилия из центрального узла в верхнем поясе на боковые части решетки, это не так. Результат здесь зависит от числа панелей. В одних случаях узел с максимальным прогибом — это центральный узел, в других — соседние с ним узлы.

Формулы, оценивающие первую частоту собственных колебаний, можно использовать для предварительного расчета проектируемой конструкции или для оценки решения, полученного в сложных инженерных программах, основанных на МКЭ. Особенно эффективны формулы, найденные методом индукции, для сложных сооружений, содержащих большое число панелей. Расчет многопанельных конструкций требует значительных вычислительных затрат и при большом числе стержней не защищен от неизбежного накопления погрешностей округления и ошибок ввода исходных данных. При этом число панелей в формулах (6), (10) и (14) ничем не ограничено, а решение дает тем большую точность, чем выше порядок регулярности конструкции.

Спектр частот

На практике в динамических расчетах строительных конструкций чаще всего исследуется пер-

вая, основная, частота спектра собственных частот. Однако для предотвращения случаев резонанса, инициированных каким-то внешним возбудителем (электрические приборы, двигатели), имеющим высокую собственную частоту колебаний, информация о высших частотах может быть важной. Особенно это имеет значение на этапе проектирования регулярных систем, когда стоит задача, например, о выборе числа панелей. Численный расчет высших частот семейства регулярных ферм, имеющих одни и те же размеры панелей, массы в узлах и упругие характеристики стержней, но отличающихся друг от друга только числом панелей, показывает интересные закономерности их спектров.

На рис. 4 на оси абсцисс отложены номера частот в спектрах, на оси ординат — собственные частоты. Спектр каждой отдельной фермы состоит из точек, соединенных некоторой условной кривой. С учетом того, что для ферм с четным числом панелей решения нет (вырождается определитель), кривые приведены только для ферм нечетного порядка. Используются следующие характеристики ферм: $F = 4 \text{ см}^2$, модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, массы в узлах $m = 200 \text{ кг}$, размеры $a = 4 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$.

Замечена особенность: высшая частота всех ферм, начиная с $n = 3$, постоянна и не зависит от порядка фермы. Кроме этого, существуют и другие частоты, одинаковые для ферм разных порядков (спектральные константы). Наиболее четко выделяются частоты 215, 485 и 580 Гц. Все эти спектральные константы (с небольшой погрешностью) образуются кратными частотами. Наличие спектральных констант позволяет легко определять соответствующие частоты ферм большого порядка по данным расче-

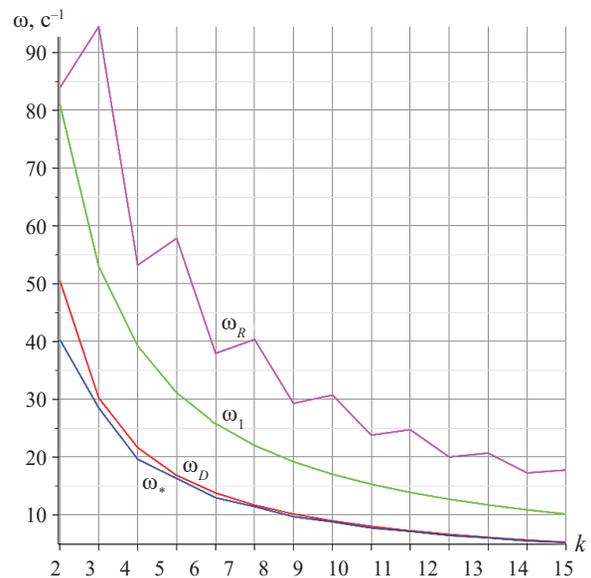


Рис. 3. Зависимость первой частоты от числа панелей, полученной тремя методами

Fig. 3. Dependence of the first frequency on the number of panels obtained by three methods

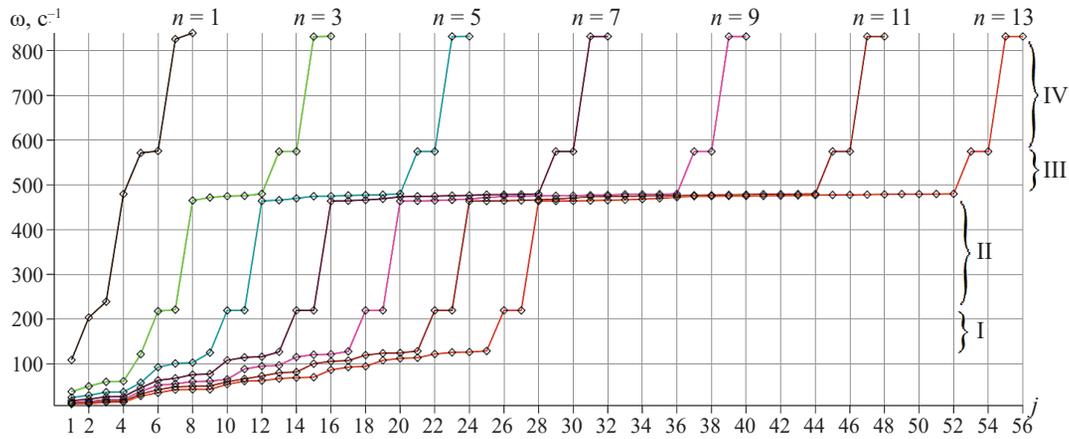


Рис. 4. Спектры частот регулярных ферм порядка 1–13
 Fig. 4. Frequency spectra of regular trusses are of the order of 1–13

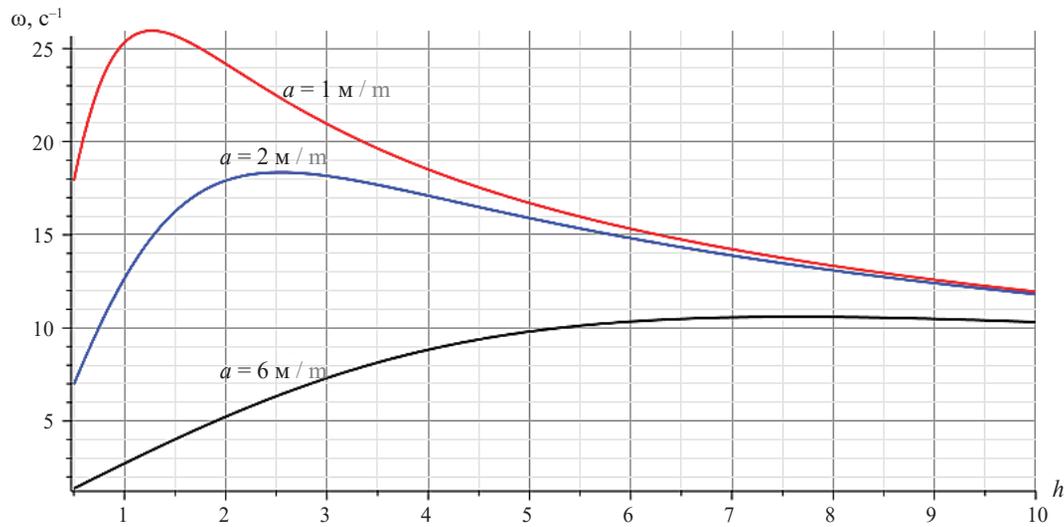


Рис. 5. Зависимость основной частоты от высоты фермы
 Fig. 5. Dependence of the fundamental frequency on the height of the truss

тов ферм порядков $n = 3, n = 5$, для которых расчеты значительно проще.

В спектрах ферм различного порядка заметны некоторые области, в которых нет собственных частот. Выделены четыре характерные области I, II, III и IV. Внешние возбудители, собственные частоты которых попадают в эти области, не вызовут резонансных явлений. Наибольшее практическое значение имеют области I и II, соответствующие меньшим частотам (области резонансной безопасности). Области III, IV звуковых частот менее востребованы. Резонансные явления на таких частотах редки.

Зависимость основной частоты от размеров конструкции

Аналитическая форма решения позволяет анализировать зависимость основной частоты от разме-

ров фермы. На рис. 5 показано, что эта зависимость при определенных значениях размера панели a обнаруживает экстремум. Для построения кривых использовано выражение для частоты (6), данные фермы те же, что и для рис. 3 и $k = 9$. Максимальное значение основной частоты зависит от высоты фермы h . С увеличением длины панели экстремум смещается в сторону больших высот, соответствующая частота уменьшается. Для больших высот ($h > 10$ м) частота почти не зависит от длины панели — кривые различных значений a практически сливаются. Значение высоты h_{max} , соответствующее максимальной частоте, можно найти из уравнения $d\omega_D/dh = 0$, используя выражение (6). Уравнение получается громоздким, но при заданных порядках k решение простое: $k = 8, h_{max} = 1,262a; k = 9, h_{max} = 1,270a; k = 10, h_{max} = 1,276a...$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена новая схема статически определимой регулярной фермы, имеющая некоторые особенности. Конструктивная особенность фермы — ряд вертикальных опор по одной ее стороне. Практически такая решетка может быть использована как ограждающая конструкция, как элемент кожуха какого-либо механизма или архитектурная деталь здания. Преимущество решения (6) по сравнению с (10) в его простоте. Другая особенность фермы — скрытая, опасная в практическом плане — это ее кинематическое вырождение при четном числе панелей в половине пролета. Хотя в реальных конструкциях нет идеальных шарниров,

соединяющих стержни, и за счет жесткого соединения в этом случае не будет кинематической изменяемости фермы, использовать потенциально опасные схемы нерационально. Проектировщики, как правило, исключают такие ситуации, изменив число панелей проектируемого сооружения всего на одну. Анализ спектров семейства регулярных ферм показал возможность расчета собственных частот ферм с большим числом панелей по данным расчетов простых ферм с несколькими панелями. Выявлены интервалы частот, в которых конструкция не имеет собственных частот независимо от числа панелей регулярной фермы (области резонансной безопасности).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Клёнов М.В., Иванов С.Ю. Учет демпфирования колебаний при динамических нагрузках в ПК «Лира» // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета : тез. докл. 2019. С. 393–394. EDN XPKWLG.

2. Брянцев А.А. Вариантное проектирование ферм с использованием программы ЛИРА-САПР // Вестник КазГАСА. 2020. Т. 3. С. 77.

3. Игнатъев В.А., Игнатъев А.В. Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : Изд-во АСВ, 2022. 306 с.

4. Канатова М.И. Частотное уравнение и анализ колебаний плоской балочной фермы // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. 2015. С. 31–34. EDN ZBBKPI.

5. Петриченко Е.А. Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 21–29. EDN PINHFN.

6. Суд И.Б. Вывод формул для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей в системе Maple // Строительная механика и конструкции. 2020. № 2 (25). С. 25–32. EDN VIOBNE.

7. Халецки М. Алгоритм вычисления перемещений в плоских рамных стержневых конструкциях // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. 2013. № 7. С. 237–252. EDN XXEBKX.

8. Комерзан Е.В., Луинов Н.А., Оситова Т.С. Аналитический расчет прогиба плоской шпренгельной фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2022. № 2 (33). С. 17–25. DOI: 10.36622/VSTU.2022.33.2.002. EDN NTJXAL.

9. Манукало А.С. Анализ значения первой частоты собственных колебаний плоской шпрен-

гельной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 54–60. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.006. EDN UXEELW.

10. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Оценка основной частоты колебаний Г-образной пространственной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 35–45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP.

11. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Аналитическая оценка основной частоты собственных колебаний регулярной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 17–26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ.

12. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

13. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

14. Kaveh A. Optimal analysis of structures by concepts of symmetry and regularity. Springer Vienna, 2013. DOI: 10.1007/978-3-7091-1565-7

15. Тиньков Д.В. Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6. EDN UHLIHV.

16. Галишников В.В., Игнатъев В.А. Регулярные стержневые системы: теория и методы расчета. Волгоград : ВолГАСУ, 2006. EDN QNMMHT.

17. Мелёхин Е.А. Анализ напряженно-деформированного состояния пролетной трехгранной фермы при линейных нагрузках // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 4. С. 556–571. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.556-571. EDN ZAYUKQ.

18. Петренко В.Ф. Оценка собственной частоты двухпролетной фермы с учетом жесткости опор // Строительная механика и конструкции. 2021. №4(31). С. 16–25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002. EDN: QJZZJK.

19. Saglik H., Balkaya C., Chen A., Ma R., Doran B. Development of natural frequency in multi-span composite bridges with variable cross-section: Analytical and numerical solutions // Structures. 2022. Vol. 45. Pp. 1657–1666. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.082

20. Бука-Вайваде К., Курсанов М.Н., Сердюк Д.О. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 4. С. 510–517. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42777640> DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

21. Курсанов М.Н. Кинематический анализ и оценка частоты собственных колебаний плоской решетки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1324–1330.

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50118989>
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1324-1330

22. Курсанов М.Н. Плоские фермы. Схемы и расчетные формулы : справочник. М. : ИНФРА-М, 2019. 238 с.

23. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses // International Journal of Mechanical Sciences. 2000. Vol. 42. Issue 7. Pp. 1287–1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

24. Kirsanov M., Ivanitskii A. Bilateral analytical estimation of the natural oscillation frequency of a planar triangular truss // AlfaBuild. 2023. Vol. 26. P. 2601. DOI: 10.57728/ALF.26.1

25. Kirsanov M. Simplified Dunkerley method for estimating the first oscillation frequency of a regular truss // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 108. P. 10801. DOI: 10.4123/CUBS.108.1

Поступила в редакцию 27 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 28 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Курсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

REFERENCES

1. Klepov M.V., Ivanov S.Yu. Accounting for vibration damping under dynamic loads in the PC “Lira”. *Review-competition of scientific, design and technological works of students of the Volgograd State Technical University*. 2019; 393-394. EDN XPKWLG. (rus.).

2. Bryantsev A.A. Variant design of trusses using the LIRA-SAPR program. *Bulletin of KazGASA*. 2020; 3:77. (rus.).

3. Ignatiev V.A., Ignatiev A.V. *Finite element method in the form of the classical mixed method of structural mechanics (theory, mathematical models and algorithms)*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 306. (rus.).

4. Kanatova M. Frequency equation and vibration analysis of a flat beam truss. *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. 2015; 31-34. EDN ZBBKPI. (rus.).

5. Petrichenko E.A. Lower bound of the natural oscillation frequency of the Fink truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):21-29. EDN PINHFN. (rus.).

6. Sud I.B. Derivation of formulas for deflection of the girder truss with an arbitrary number of panels in the maple system. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 2(25):25-32. EDN VI0BNE. (rus.).

7. Chalecki M. The algorithm for calculation of displacements in flat frame constructions. *Mechanics. Scientific Research and Educational and Methodological Developments*. 2013; 7:237-252. EDN XXEBKX. (rus.).

8. Komerzan E.V., Lushnov N.A., Osipova T.S. Analytical calculation of the deflection of a planar truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2022; 2(33):17-25. DOI: 10.36622/VSTU.2022.33.2.002. EDN NTJXAL. (rus.).

9. Manukalo A.S. Analysis of a planar Sprengel truss first frequency natural oscillations value. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):54-60. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.006. EDN UXEELW. (rus.).

10. Komerzan E.V., Maslov A.N. Estimation of the I-shaped spatial truss fundamental frequency oscillations. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):35-45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP. (rus.).

11. Komerzan E.V., Maslov A.N. Analytical evaluation of a regular truss natural oscillations fundamental frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):17-26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ. (rus.).

12. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
13. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
14. Kaveh A. *Optimal analysis of structures by concepts of symmetry and regularity*. Springer Vienna, 2013. DOI: 10.1007/978-3-7091-1565-7
15. Tinkov D.V. Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 5(57):66-73. DOI: 10.5862/MCE.57.6. EDN UHLIHV. (rus.).
16. Galishnikova V.V., Ignatiev V.A. *Regular rod systems: theory and calculation methods*. Volgograd, VolgGASU, 2006. EDN QNMMHT. (rus.).
17. Melyokhin E.A. Analysis of the stress-strain state of the spanning trihedral truss under linear loads. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(4):556-571. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.556-571. EDN ZAYUKQ. (rus.).
18. Petrenko V.F. Estimation of the natural frequency of a two-span truss, taking into account the support stiffness. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 4(31):16-25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002. EDN: QJZZJK. (rus.).
19. Saglik H., Balkaya C., Chen A., Ma R., Doran B. Development of natural frequency in multi-span composite bridges with variable cross-section: Analytical and numerical solutions. *Structures*. 2022; 45:1657-1666. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.082
20. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(4):510-517. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42777640> DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
21. Kirsanov M.N. Kinematic analysis and estimation of the frequency of natural oscillations of a planar lattice. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(10):1324-1330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50118989> DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1324-1330 (rus.).
22. Kirsanov M.N. *Planar trusses. Schemes and calculation formulas : handbook*. Moscow, INFRA-M, 2019; 238. (rus.).
23. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000; 42(7):1287-1305. DOI: 10.1016/s0020-7403(99)00049-1
24. Kirsanov M., Ivanitskii A. Bilateral analytical estimation of the natural oscillation frequency of a planar triangular truss. *AlfaBuild*. 2023; 26:2601. DOI: 10.57728/ALF.26.1
25. Kirsanov M. Simplified Dunkerley method for estimating the first oscillation frequency of a regular truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 108:10801. DOI: 10.4123/CUBS.108.1

Received September 27, 2023.

Adopted in revised form on October 8, 2023.

Approved for publication on November 28, 2023.

BIONOTES: **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 694:69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.387-393

Разработка конструктивного решения сопряжений колонн и ригелей из древесины на металлических накладках и шурупах

Максим Александрович Дежин, Александр Майорович Ибрагимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальным является вопрос развития конструктивных решений соединений деревянных элементов, в частности сопряжений колонн и ригелей. Рассмотрены преимущества и особенности основных существующих способов соединения деревянных колонн и ригелей.

Материалы и методы. По характеру разрушения ранее испытанных образцов соединений деревянных элементов на накладках одного из производителей установлено, что определяющим фактором разрушения образцов стало недостаточное значение усилия отрыва накладки от деревянного элемента и несовершенство конструкции накладок. Предложено увеличить несущую способность и снизить деформативность соединений путем модификации соединений с внедрением эпоксидной смолы между шурупом и древесиной и между накладкой и торцом деревянного элемента, к которому она закреплена, и модификации конструкции накладок.

Результаты. Разработано конструктивное решение сопряжений деревянных колонн и ригелей, обладающее повышенной надежностью по сравнению с изученными соединениями и лишенное их недостатков. Этот результат достигнут за счет наличия клеевого слоя между шурупом и древесиной, а также между накладкой и деревянным элементом; выполнения насечек на сторонах накладок, крепящихся к деревянным элементам; увеличенной длины шурупов, ввинчиваемых в накладку с пазом, по сравнению с длиной шурупов, ввинчиваемых в накладку с шипом; размещения отверстий под шурупы под углом 90° к поверхности накладки, в которую закручиваются шурупы; большой степени расширения в форме клина поперечных сечений шипа и паза накладок в продольном направлении приложения нагрузки к соединению; отсутствия контакта шипа и паза накладок в нижних их частях.

Выводы. Проведенные исследования позволят расширить номенклатуру соединений деревянных элементов и повысить надежность конструирования конструкций на основе деревянных элементов с использованием металлических накладок. Разработанный узел соединения может быть применен при строительстве, реконструкции и реставрации деревянных зданий и сооружений различного назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: древесина, соединение деревянных элементов, деревянные колонны, деревянные балки, металлические накладки, шурупы, огнезащита соединения, повышение надежности

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам, кафедре металлических и деревянных конструкций и НИУ МГСУ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дежин М.А., Ибрагимов А.М. Разработка конструктивного решения сопряжений колонн и ригелей из древесины на металлических накладках и шурупах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 387–393. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.387-393

Автор, ответственный за переписку: Максим Александрович Дежин, maksim1403@yandex.ru.

Development of a constructive solution of wood columns and crossbars interfaces on metal overlays and screws

Maxim A. Dezhin, Aleksandr M. Ibragimov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the advantages and features of the main existing methods of connecting wooden columns and crossbars.

Materials and methods. It was proposed to increase the load-bearing capacity and reduce the deformability of joints by modifying the joints with the introduction of epoxy resin between the screw and the wood and between the overlay and the end of the wooden element to which it is attached and modifying the design of the overlays.

Results. As a result, a constructive solution for connecting wooden columns and crossbars was developed, which has increased reliability compared to the studied connections and is free of their disadvantages. This result was achieved due to the presence of an adhesive layer between the screw and the wood, as well as between the overlay and the wooden element, the making of notches on the sides of the overlays attached to the wooden elements, the increased length of the screws screwed into the overlay with a groove, compared to the length of the screws screwed into an overlay with a tenon, placement of holes for screws at an angle of 90° to the surface of the overlay into which the screws are screwed.

Conclusions. An urgent issue is the development of constructive solutions for connections of wooden elements, in particular the interfaces of columns and crossbars. The paper discusses the advantages and features of the main existing methods of connecting wooden columns and crossbars.

KEYWORDS: wood, connection of wooden elements, wooden columns, wooden beams, metal overlays, screws, fire protection of the connection, open connection, concealed connection, increased reliability

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers, the Department of Metal and Wooden Structures and the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU).

FOR CITATION: Dezhin M.A., Ibragimov A.M. Development of a constructive solution of wood columns and crossbars interfaces on metal overlays and screws. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):387-393. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.387-393 (rus.).

Corresponding author: Maxim A. Dezhin, maksim1403@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют разнообразные варианты соединений деревянных элементов строительных конструкций. Актуальным является вопрос развития конструктивных и технологических решений соединений деревянных элементов, в частности сопряжений колонн и ригелей. Опираясь на мировой опыт соединений деревянных колонн и ригелей, можно сделать вывод, что в большинстве случаев для таких целей используются заводского изготовления уголки или опоры бруса раскрытого или закрытого типов различных вариантов исполнения и форм [1–3]. Основной недостаток таких способов соединения рассматриваемых элементов — невозможность выполнить его полностью скрытым. Это приводит к отсутствию огнезащиты соединительных элементов и требует дополнительных мер отделки несущих конструкций с эстетической целью.

Цель работы — разработка узлового сопряжения деревянных колонн и ригелей, обладающего повышенной надежностью по сравнению с изученными соединениями и лишенного их недостатков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По характеру разрушения ранее испытанных образцов соединений деревянных элементов на ме-

таллических накладках одного из производителей было установлено, что определяющим фактором разрушения образцов стало недостаточное значение усилия отрыва металлической накладки от деревянного элемента вследствие малого значения усилия на выдергивание, которое могли выдержать шурупы и несовершенство конструкции накладок (в отдельных областях наблюдалось значительное их смятие по причине неправильного распределения нагрузок в местах контакта пары соединяемых накладок) [4–8]. Это отражено на рис. 1–3.

По результатам испытаний было предложено несколько способов увеличения несущей способности и снижения деформативности соединений деревянных элементов с применением металлических накладок. Первый способ предполагает достижение этой цели путем увеличения значения усилия отрыва металлической накладки от деревянного элемента за счет модификации соединений с внедрением эпоксидной смолы между шурупом и древесиной и между металлической накладкой и торцом деревянного элемента, к которому она закреплена. Второй способ представляет собой увеличение несущей способности и снижение деформативности соединений путем модификации конструкции металлических накладок для правильного распределения прикладываемых к соединению нагрузок в соединении



Рис. 1. Общий вид образца

Fig. 1. General view of the specimen



Рис. 2. Образец после испытаний

Fig. 2. Specimen after testing

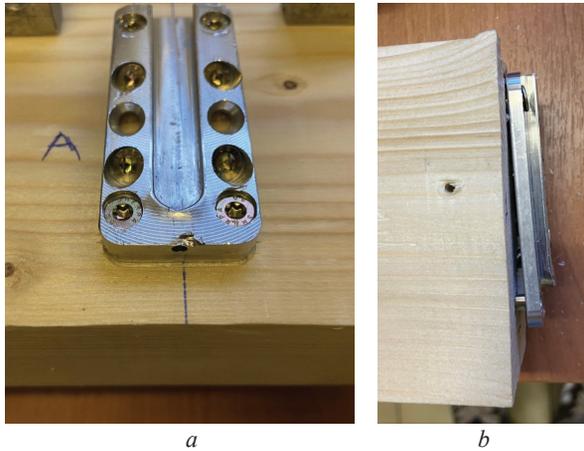


Рис. 3. Смятие контактных зон: *a* — накладки с пазом; *b* — накладки с шипом

Fig. 3. Collapse of contact areas: *a* — lining with groove; *b* — lining with tenon

накладок и передачи нагрузок от одного элемента к другому в соединяемых накладках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа ранее рассмотренных способов соединений деревянных колонн и ригелей, других менее распространенных способов соединений таких элементов, проведенных экспериментальных исследований и изученной литературы разработано конструктивное решение сопряжений деревянных колонн и ригелей на основе металлических накладок, обладающее повышенной надежностью по сравнению с изученными соединениями и лишенное их недостатков [9–20]. Эти результаты были достигнуты благодаря конструкции накладок, отсутствию контакта шипа и паза накладок в ниж-

них их частях, выполнению насечек на сторонах металлических накладок, крепящихся к деревянным элементам, и, как следствие, увеличению коэффициента трения поверхностей; а также тому, что: поперечные сечения шипа и паза накладок имеют большую степень расширения в форме клина в продольном направлении приложения нагрузки к соединению; длина шурупов, ввинчиваемых в накладку с пазом, больше длины шурупов, ввинчиваемых в накладку с шипом; все отверстия под шурупы размещены под углом 90° к поверхности накладки, в которую завинчиваются шурупы. Поставленной цели удастся добиться и благодаря равномерному по высоте и глубине отверстия импрегнированию древесины клеевыми составами в районе резьбы шурупа и за ее пределами вследствие увеличения рабочей зоны шурупа; повышению степени сцепления шурупов со стенками отверстий; нивелированию возможных нарушений структуры древесины в пределах резьбового соединения; образованию после полимеризации клея модифицированного слоя древесины с повышенными физико-механическими характеристиками гнезд древесины вокруг шурупов — наиболее напряженной зоне соединения; увеличению глубины пропитки древесины вокруг шурупа из-за создания в момент ввинчивания шурупов давления на находящийся в отверстиях клей и вдавливания его в стенки отверстий; внедрению в конструкцию соединения клеевого слоя между задней поверхностью металлической накладки и деревянным элементом.

Общий вид разработанного узла соединения показан на рис. 4, 5. Узел представляет собой разъемное соединение колонн и ригелей из клееной древесины, состоящее из колонны, ригеля и со-

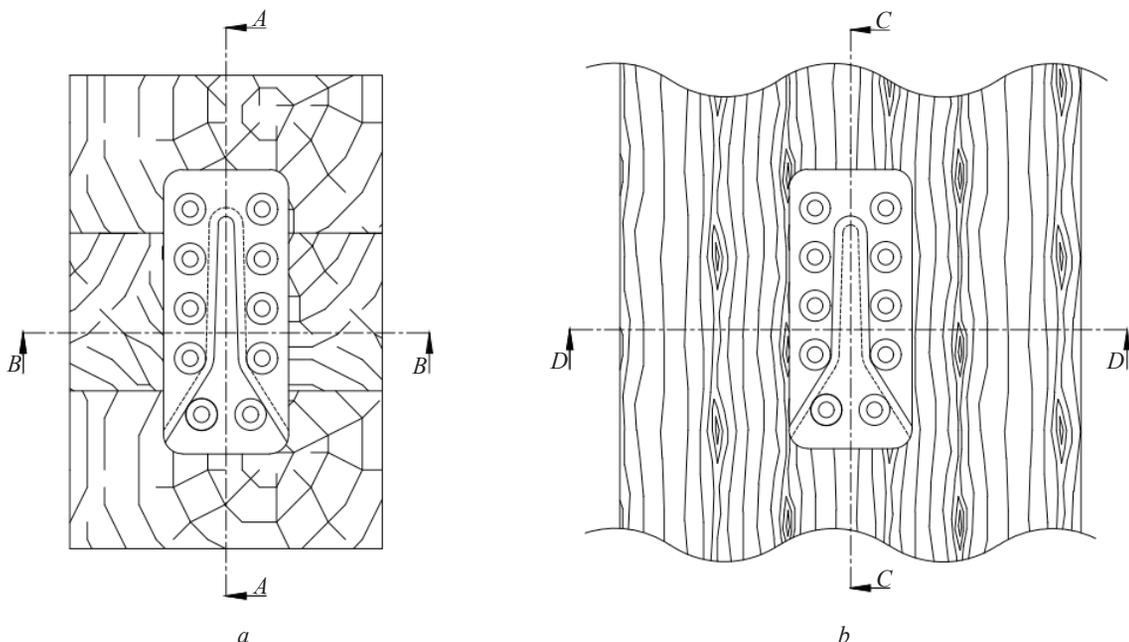


Рис. 4. Схема расположения металлической накладки: *a* — на ригеле; *b* — на колонне

Fig. 4. Layout of the metal overlay: *a* — on the crossbar; *b* — on the column

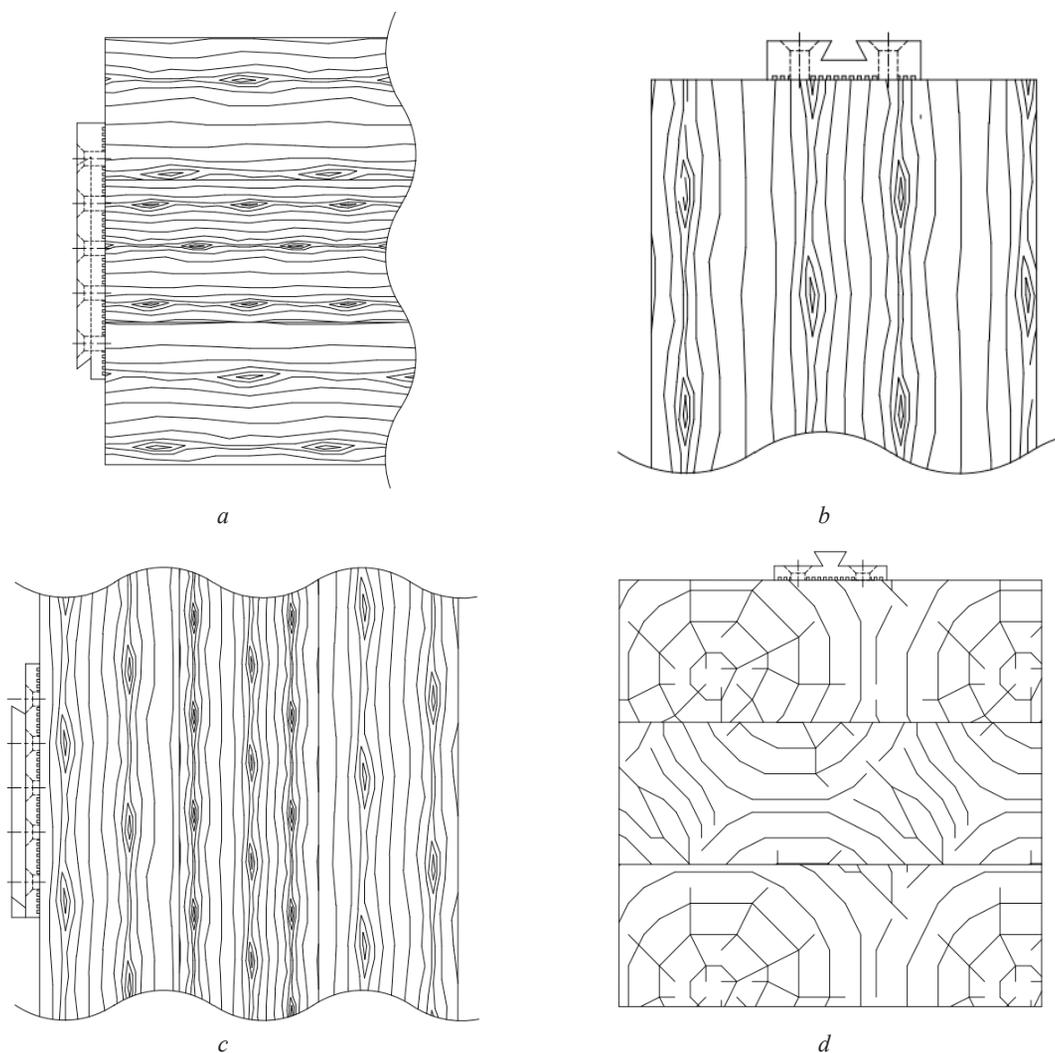


Рис. 5. Сечение: *a* — *A-A* на рис. 4, *a*; *b* — *B-B* на рис. 4, *a*; *c* — *C-C* на рис. 4, *b*; *d* — *D-D* на рис. 4, *b*

Fig. 5. Section: *a* — *A-A* in Fig. 4, *a*; *b* — *B-B* in Fig. 4, *a*; *c* — *C-C* in Fig. 4, *b*; *d* — *D-D* in Fig. 4, *b*

единительных элементов (двух стальных накладок (одна — с шипом, другая — с пазом)), поперечные сечения шипа и паза которых имеют форму ласточкина хвоста и расширяются в форме клина в продольном направлении приложения нагрузки к соединению, которые закреплены к двум деревянным элементам с помощью клеевинченных шурупов, для образования жесткого и надежного соединения по принципу «ласточкин хвост» и передачи нагрузок от одного элемента к другому. Между шурупом и древесиной, а также между металлической накладкой и деревянным элементом присутствует клеевой слой из эпоксидной смолы и отвердителя. Соединение выполнено закрытым способом путем фрезерования паза в ригеле. На рис. 4, 5 для наглядности соединение выполнено открытым способом.

В качестве материала изготовления соединительных элементов используется конструкционная легированная сталь. На сторонах металлических накладок, крепящихся к деревянным элементам, выполнены насечки. Форма поперечного сечения паза

в форме ласточкина хвоста с клиновидным уширением обеспечивает удобство вставки накладки с шипом в накладку с пазом. Между шипом накладки с шипом и пазом накладки с пазом в узких их частях в вертикальном направлении выполнен зазор для обеспечения распределения внутренних напряжений, возникающих при нагружении соединения, по длине боковых граней шипа и паза. Общая длина шурупов, ввинчиваемых в накладку с пазом, больше длины шурупов, ввинчиваемых в накладку с шипом. В качестве клеевого слоя между шурупом и древесиной, а также между металлической накладкой и древесиной может использоваться эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель ТЭТА, эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель ПЭПА, эпоксидная смола DER-331 и отвердитель ТЭТА, эпоксидная смола DER-331 и отвердитель ПЭПА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования позволили разработать конструктивное решение сопряжений деревянных колонн и ригелей на основе металлических

накладок, обладающее повышенной надежностью по сравнению с изученными соединениями и лишнее их недостатков, и повысить надежность конструирования конструкций на основе деревянных элементов с использованием металлических

накладок. Разработанный узел соединения может быть применен при строительстве, реконструкции и реставрации деревянных зданий и сооружений различного назначения, в том числе многоэтажных и большепролетных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chernova T., Melekhov V. Behavior of timber-timber composite structure connected by inclined screws // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 4 (120). P. 12004. DOI: 10.34910/MCE.120.4.EDN LTHOSP.
2. Leijten A.J.M., Franke S., Quenneville P., Gupta R. Bearing strength capacity of continuous supported timber beams: Unified approach for test methods and structural design codes // Journal of Structural Engineering. 2012. Vol. 138. Issue 2. Pp. 266–272. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000454
3. Leijten A.J.M., Larsen H.J., Van der Put T.A.C.M. Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Issue 3. Pp. 252–257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.042
4. Dezhin M., Ibragimov A. Improving the reliability of the joints of wooden elements on metal linings // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 402. P. 10005. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210005
5. Dezhin M., Ibragimov A. Increasing the bearing capacity of the joints of wooden elements on metal plates // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 341–348. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_32
6. Дежин М.А., Ибрагимов А.М. Изучение характера деформативности соединений деревянных элементов на металлических накладках с применением ввинченных шурупов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 1 (1061). С. 52–53. EDN XQUFJH.
7. Дежин М.А. Несущая способность и деформативность соединений деревянных элементов на металлических накладках с использованием ввинченных шурупов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6 (78). С. 264–271. EDN FUXSTM.
8. Дежин М.А. Оценка влияния применения эпоксидного клея на прочностные показатели и деформации соединений деревянных элементов на металлических накладках с применением ввинченных шурупов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 2 (1050). С. 28–30. EDN INMZAF.
9. Madsen B., Hooley R., Hall C. A design method for bearing stresses in wood // Canadian Journal of Civil Engineering. 1982. Vol. 9. Issue 2. Pp. 338–349. DOI: 10.1139/l82-035
10. Leijten A. The bearing strength capacity perpendicular to grain of norway spruce — Evaluation of three structural timber design models // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 105. Pp. 528–535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.170
11. Hoffmeyer P., Damkilde L., Pedersen T. Structural timber and glulam in compression perpendicular to grain // Holz als Roh- und Werkstoff. 2000. Vol. 58. Issue 1–2. Pp. 73–80. DOI: 10.1007/s001070050390
12. De Santis Y., Fragiaco M. Timber-to-timber and steel-to-timber screw connections: Derivation of the slip modulus via beam on elastic foundation model // Engineering Structures. 2021. Vol. 244. P. 112798. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112798
13. Hamid Mirdad M., Jucutan K., Niederwestberg J., Hei Chui Y. Embedment and withdrawal stiffness predictions of self-tapping screws in timber // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 345. P. 128394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128394
14. Линьков В.И. Повышение несущей способности соединений на наклонных ввинченных стержнях // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11 (71). С. 339–346. EDN JSHPHD.
15. Линьков В.И. Напряженное состояние наклонных металлических стержней в деревянных элементах составного сечения // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 159. EDN OBUTSB.
16. Линьков В.И. Несущая способность и деформативность НВС-соединений деревянных элементов при различном положении ввинченного стержня // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 4 (394). С. 179–185. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_4_179. EDN YMIRHW.
17. Линьков В.И. Соединения на наклонных ввинченных стержнях в деревянных балках для реконструкции зданий текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3 (369). С. 212–217. EDN ZIWDVAV.
18. Линьков В.И. Применение древесины мягких лиственных пород в деревянных элементах составного сечения на наклонных ввинченных стержнях // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 2 (380). С. 153–158. EDN SQMHPE.
19. Линьков В.И. К вопросу проектирования составных деревянных балок на наклонных металлических стержнях для покрытий реконструируемых объектов текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 3 (375). С. 84–89. EDN VJQDJY.

20. Сюй Ю. Повышение несущей способности соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках с исполь-

зованием металлической зубчатой пластины : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 198 с. EDN XZRHZB.

Поступила в редакцию 24 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 11 декабря 2023 г.

О Б АВТОРАХ: **Максим Александрович Дежин** — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 947750, ResearcherID: ABE-2168-2021, Scopus: 57889248000, ORCID: 0000-0002-6142-0258; maksim1403@yandex.ru;

Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, ResearcherID: AFN-6830-2022, Scopus: 57189524528, ORCID: 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chernova T., Melekhov V. Behavior of timber-timber composite structure connected by inclined screws. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 4(120):12004. DOI: 10.34910/MCE.120.4.EDN LTHOSP.
2. Leijten A., Franke S., Quenneville P., Gupta R. Bearing strength capacity of continuous supported timber beams: Unified approach for test methods and structural design codes. *Journal of Structural Engineering*. 2012; 138(2):266-272. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000454
3. Leijten A.J.M., Larsen H.J., Van der Put T.A.C.M. Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams. *Construction and Building Materials*. 2010; 24(3):252-257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.042
4. Dezhin M., Ibragimov A. Improving the reliability of the joints of wooden elements on metal linings. *E3S Web of Conferences*. 2023; 402:10005. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210005
5. Dezhin M., Ibragimov A. Increasing the bearing capacity of the joints of wooden elements on metal plates. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 341-348. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_32
6. Dezhin M.A., Ibragimov A.M. The study of the nature of the deformability of wooden elements joints on metal lips with the application of screws. *BST: Bulletin of the Construction Equipment*. 2023; 1(1061):52-53. EDN XQUFJH. (rus.)
7. Dezhin M.A. Bearing capacity and deformability of joints of wooden elements on metal plates using screwed in screws. *Engineering Journal of Don*. 2021; 6(78):264-271. EDN FUXSTM. (rus.)
8. Dezhin M.A. Estimation of the influence of the application of epoxy glue on the strength indicators and deformation of joints of wooden elements on metal plates with the application of screws. *BST: Bulletin of the Construction Equipment*. 2022; 2(1050):28-30. EDN INMZAF. (rus.)
9. Madsen B., Hooley R., Hall C. A design method for bearing stresses in wood. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1982; 9(2):338-349. DOI: 10.1139/l82-035
10. Leijten A. The bearing strength capacity perpendicular to grain of Norway spruce — Evaluation of three structural timber design models. *Construction and Building Materials*. 2016; 105:528-535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.170
11. Hoffmeyer P., Damkilde L., Pedersen T. Structural timber and glulam in compression perpendicular to grain. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2000; 58(1-2):73-80. DOI: 10.1007/s001070050390
12. De Santis Y., Fragiaco M. Timber-to-timber and steel-to-timber screw connections: Derivation of the slip modulus via beam on elastic foundation model. *Engineering Structures*. 2021; 244:112798. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112798
13. Hamid Mirdad M., Jucutan K., Niederwestberg J., Hei Chui Y. Embedment and withdrawal stiffness predictions of self-tapping screws in timber. *Construction and Building Materials*. 2022; 345:128394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128394
14. Linkov V.I. Increasing the bearing capacity of connections on inclined screwed rods. *Engineering Journal of Don*. 2020; 11(71):339-346. EDN JSHPHD. (rus.)
15. Linkov V.I. The stress condition of inclined metal rods in the timber elements of the built-up section. *Engineering journal of Don*. 2019; 1(52):159. EDN OBUTSB. (rus.)
16. Linkov V.I. Bearing capacity and deformability of ISR-connections of wooden elements at different positions of the screwed-in rod. *Textile Industry Technology (Series: Proceedings of Higher Educational In-*

stitutions). 2021; 4(394):179-185. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_4_179. EDN YMIRHW. (rus.).

17. Linkov V.I. Connections on inclined screwed rods in wooden beams for the reconstruction of textile industry buildings. *Textile Industry Technology (Series: Proceedings of Higher Educational Institutions)*. 2017; 3(369):212-217. EDN ZIWDAV. (rus.).

18. Linkov V.I. Use of soft hardwood in wooden elements of composite section on inclined metal rods. *Textile Industry Technology (Series: Proceedings of Higher Educational Institutions)*. 2019; 2(380):153-158. EDN SQMHPE. (rus.).

19. Linkov V.I. On the question of designing composite wooden beams on inclined metal rods for coatings of reconstructed in textile industry. *Textile Industry Technology (Series: Proceedings of Higher Educational Institutions)*. 2018; 3(375):84-89. EDN VJQDJY. (rus.).

20. Syuj Yu. *Increasing the load-bearing capacity of connections between wooden structural elements on metal plates using a metal toothed plate : thesis of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2015; 198. EDN XZRHZB. (rus.).

Received October 24, 2023.

Adopted in revised form on October 24, 2023.

Approved for publication on December 11, 2023.

B I O N O T E S : **Maxim A. Dezhin** — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 947750, ResearcherID: ABE-2168-2021, Scopus: 57889248000, ORCID: 0000-0002-6142-0258; maksim1403@yandex.ru;

Aleksandr M. Ibragimov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, ResearcherID: AFN-6830-2022, Scopus: 57189524528, ORCID: 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Определение долговечности строительной керамики

Дмитрий Юрьевич Желдаков¹, Владимир Трофимович Ерофеев²

¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Масштабные натурные исследования разрушения кирпичной кладки, проведенные во многих регионах мира, показали, что подход к изучению долговечности строительной керамики на основании параметров прочности и морозостойкости не является показательным. Данные параметры не дают возможности получить временное значение долговечности материала, а служат лишь основанием для экспертной оценки.

Материалы и методы. Доказывается выдвинутая научная гипотеза о том, что разрушение материала кирпича в кирпичной кладке ограждающих конструкций происходит под действием процессов химической коррозии. Описывается процесс химической коррозии, кратко приводятся результаты термодинамических расчетов химических процессов. Дается краткое описание методик исследования долговечности материала строительной керамики, которые в настоящее время получили статус стандартов.

Результаты. Представлены результаты лабораторных исследований процесса химической деструкции материала строительной керамики, а также расчетов долговечности материала строительной керамики, выполненных на основании разработанного метода расчета долговечности материала.

Выводы. На базе разработанного теоретического обоснования и проведенных лабораторных исследований процесса химической деструкции материала стеновой керамики делается вывод о том, что созданная методика исследований и метод расчета позволяют определить долговечность материала на любых стадиях его эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная керамика, химическая коррозия, долговечность, кинетика процесса, методика исследований, морозостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Желдаков Д.Ю., Ерофеев В.Т. Определение долговечности строительной керамики // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 394–402. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Желдаков, djeld@mail.ru.

Determination of durability of building ceramics

Dmitriy Yu. Zheldakov¹, Vladimir T. Erofeev²

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Large-scale field studies of the destruction of brickwork carried out by the author in many regions of the world showed that the approach to the research of the durability of building ceramics based on the strength parameter and the frost resistance parameter are not indicative. These parameters do not make it possible to obtain a temporary value of the durability of the material, but are just the basis for an expert assessment.

Materials and methods. This paper proves the scientific hypothesis put forward by the author that the destruction of brick material in the brickwork of enclosing structures occurs under the influence of chemical corrosion processes. The process of chemical corrosion is described, the results of thermodynamic calculations of chemical processes are briefly presented. A brief description of the methods of studying the durability of the building ceramics material, which have now received the status of standards, is given.

Results. The results of laboratory studies of the process of chemical destruction of the building ceramics material, as well as calculations of the durability of the building ceramics material performed on the basis of the developed method of calculating the durability of the material are presented.

Conclusions. Based on the developed theoretical justification and laboratory studies of the process of chemical destruction of the wall ceramics material, it is concluded that the created research methodology and calculation method allow to determine the durability of the material at any stage of its operation.

KEYWORDS: building ceramics, chemical corrosion, durability, kinetics of the process, research methodology, frost resistance

FOR CITATION: Zheldakov D.Yu., Erofeev V.T. Determination of durability of building ceramics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):394-402. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy Yu. Zheldakov, djeld@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В истории строительства можно выделить два основных периода, в течение которых для обоснования долговечности материала кирпича использовались определенные показатели.

Первым регламентирующим документом, который можно считать началом технического контроля за производством и качеством кирпича в России, является трактат-кодекс, составленный великими русскими архитекторами, работавшими в Комиссии о Санкт-Петербургском строении в 1720–1740 гг. [1, 2]. В данном документе кирпич предлагалось разделять на шесть видов, пять из которых (сырец исключался) по цвету: железный, полужелезный, красный, алый и белый. При этом подразумевалось, что цвет кирпича соответствует степени обжига.

Можно предположить, что цвет кирпича определяет его прочность, а прочность влияет на долговечность. Д.Ю. Желдаковым проведен ряд исследований на более чем 50 объектах исторических зданий [3]. По результатам исследований автором составлена таблица корреляции между цветом кирпича и его прочностью (табл.).

На рис. 1 можно увидеть разницу в степени деструкции, которая для более светлых кирпичей значительна по сравнению с черными кирпичами,

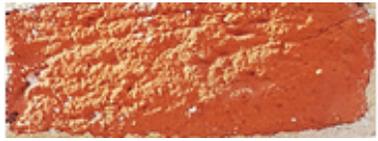
а степень разрушения темных красных кирпичей занимает промежуточное место. Корреляция между прочностью и долговечностью кирпича на отдельно взятом памятнике очевидна. Однако надо отметить, что на всех объектах сравниваются кирпичи, произведенные из одинаковой глины по одинаковой технологии. Сравнивая скорость разрушения кирпичей из разных регионов, т.е. с разным составом глины, разным процессом сушки и обжига, мы не можем получить какой-либо зависимости между цветом кирпича и его прочностью. И еще более важно, что, используя эти параметры, рассчитать долговечность материала кирпича невозможно.

Следующим этапом в анализе долговечности материала кирпича стало исследование морозостойкости. В 1884 г. на международном конгрессе по установлению однообразных способов испытания строительных материалов в Париже представитель от России в совете международного общества испытания материалов профессор Н.А. Белелюбский сделал доклад [4], где впервые представил метод испытания керамических камней на морозостойкость.

Методика проведения исследований, предложенная на конгрессе 1884 г., проста и мало изменилась в наши дни. Автор испытаний на морозостойкость критически подходил к разработанному

Соответствие между цветом кирпича и его прочностью

The correspondence between the colour of the brick and its strength.

Марка Grade	Номер разбора (по Правилам 1847 г.) Partition number (according to the Rules of 1847)	Внешний вид Appearance	Прочность на сжатие, кгс/см ² Compressive strength, kgf/cm ²
Красный Red	1		250–350
Оранжевый (добавлен автором) Orange (added by the author)	–s		170–250
Полужелезняк Semi-iron	2		350–400
Железняк Iron-stone	3		400–500 (625)
Алый Scarlet	4		100–110 (87)

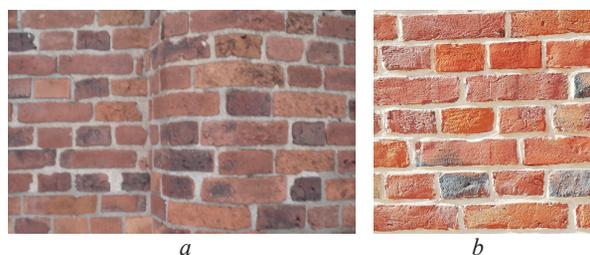


Рис. 1. Разрушение кирпичей разного цвета (прочности): *a* — кладка XVI в., г. Стокгольм; *b* — кладка XVII в., г. Минск

Fig. 1. Destruction of bricks of different colours (strength): *a* — masonry of the XVI century, Stockholm; *b* — masonry of the XVII century, Minsk

им методу. В докладе 1884 г. говорится: «Замораживание камней не дает никакого указания на абсолютное сопротивление действию мороза. Значение вышеприведенного исследования только относительное, так как оно позволяет только узнать, какие из камней скорее всего могут пострадать от действия мороза». Тем не менее испытания материалов на морозостойкость прочно вошли в современную практику. Сменив показатель прочности, показатель по морозостойкости используется в наши дни для оценки долговечности.

Однако уже в середине прошлого века испытания на долговечность по показателю морозостойкости начали ставить под сомнение [5, 6]. Многочисленные натурные и лабораторные исследования, выполненные автором, подтверждают тезис о том, что испытания на морозостойкость не дают надежного определения долговечности материала кирпича. На рис. 2 показаны два из исследованных объектов.

Анализ разрушения кладки, показанный на рис. 2, позволяет сделать следующие важные выводы: 1) схе-

ма разрушения кирпича не может быть описана внешним воздействием, так как при условии равного воздействия атмосферных условий на рядом уложенные кирпичи: температуры и влажности, кирпичи разрушаются неравномерно; 2) процесс разрушения протекает и без влияния отрицательных температур, так как в г. Сиена температура не снижается ниже нуля градусов (рис. 2, *a*).

Обследования имеют значительно более широкую географию, при этом все исследования подтверждают следующие выводы:

- механизм деструкции материала кирпича в кирпичной кладке одинаков и не зависит от времени производства кладки и от климата, в котором расположено здание с кирпичными ограждающими конструкциями. Кирпичная кладка зданий, возведенных в XII–XV вв. и в середине XX в., в зданиях, расположенных и в мягком средиземноморском, и в резко континентальном климате, разрушается в соответствии с едиными принципами;

- количество циклов заморозания–оттаивания не является определяющим параметром долговечности материала кирпича. При одинаковых климатических условиях (увлажнение, цикличность температуры, в том числе количество переходов через ноль) скорость деструкции кирпичей, даже находящихся рядом в кирпичной кладке, может значительно различаться.

Так как натурными исследованиями доказано, что процесс деструкции кирпича может протекать только при положительных температурах (рис. 2, *a*), использование параметра морозостойкости для оценки долговечности приводит к серьезным ошибкам, хотя и предлагается многими исследователями [7–10]. Расчет долговечности материала кирпича с использованием в качестве основного параметра



a



b

Рис. 2. Разрушение кирпичной кладки исторических зданий из полнотелого красного кирпича: *a* — крепость св. Варвары (вторая половина XVI в.), г. Сиена, Италия; *b* — храм Рождества Пресвятой Богородицы в Бутырской слободе (1682–1684 гг.), г. Москва, Россия

Fig. 2. Destruction of brickwork of historical buildings made of solid red brick: *a* — the Fortress of St. Barbara (second half of XVI century), Siena, Italy; *b* — the Church of the Nativity of the Holy Virgin Theotokos in Butyrskaya Sloboda (1682–1684), Moscow, Russia

марки кирпича по морозостойкости [11] невозможен, поскольку данный параметр дает лишь относительную оценку по критерию «да/нет» разрушению материала после определенного количества циклов замораживания–оттаивания.

Автором выдвинута гипотеза, что процесс деструкции материала стеновой керамики можно описать на основании законов физической химии, приняв за основу химическую природу процессов химической коррозии материала строительной керамики. Такой подход не только позволит более точно и корректно описать процесс деструкции, но и определить долговечность материала кирпича во временных единицах, что и стало целью настоящего исследования. При этом политермическое воздействие на кирпич приводит к ускорению разрушения материала, ослабленному процессами химической коррозии [12, 13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Химическая деструкция кирпича и кирпичной кладки описывается многостадийным процессом. На первой нехимической стадии происходит увлажнение материала стеновой керамики. На первой химической стадии процесса в материале кирпича происходит образование щелочей из оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. Щелочь может также поступать в кирпич из цементно-песчаного раствора. В основном это гидроксид кальция, образующийся в цементно-песчаном растворе при протекании процесса выщелачивания [14–17]. На второй химической стадии наблюдается взаимодействие образовавшихся в материале кирпича или/и поступивших в него из цементно-песчаного раствора щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы. При этом происходит полное разрушение материала кирпича до размеров частиц порядка 10^{-5} – 10^{-6} м, так как аморфная составляющая служит связующей фазой материала.

Для теоретического обоснования данного предположения, а также уточнения химических реакций, преимущественно протекающих при химической деструкции материала стеновой керамики, были выполнены термодинамические расчеты. В расчетах учтены 265 химических реакций, предположительно участвующих в процессе. Расчеты проводились с использованием стандартных термодинамических характеристик веществ с вычислением значения изобарно-изотермического потенциала реакции от температуры [18].

На основании выполненных расчетов определены направление протекания реакций и оценка их энергетической возможности; вероятность протекания реакций в одной системе при условии идентичности исходных структурных и кинетических факторов, а также выявлена устойчивость образующихся соединений. Термодинамические расчеты теоретически подтвердили правильность принятой

схемы процесса деструкции стеновой керамики, позволили уточнить процессы деструкции с установлением конечных продуктов реакций, а также сформулировать основные направления исследований кинетики процесса. Эти направления определяются исходя из ключевых факторов, влияющих на скорость химических реакций: концентрации веществ, вступающих в реакцию, и температуры протекания процесса.

Для исследования кинетики процесса были разработаны две методики, в настоящее время утвержденные как стандарты РФ^{1,2}. Стандартами вводится новый показатель работы строительной керамики: коэффициент химической деструкции C_d . Вводимый показатель имеет размерность, %/ч или ч⁻¹, что делает возможным его использование в расчете долговечности материала. Методика определения коррозионной активности влаги позволяет получить численные значения скорости образования щелочей при взаимодействии оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, присутствующих в материале кирпича, при его увлажнении. Получив кинетические характеристики процесса химической деструкции, можно составить феноменологическое уравнение долговечности материала стеновой керамики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Автором проведено значительное количество исследований кинетики процесса химической деструкции материала кирпича [19–21]. Так, например, важным результатом исследования было доказательство того, что концентрация гидроксидов щелочных металлов, в том числе через реакции образования хорошо растворимых силикатов калия и натрия, стабилизируется на уровне равновесной концентрации в данной системе.

Для доказательства этого утверждения проанализирован водородный показатель pH раствора в процессе эксперимента по определению коррозионной активности влаги. Важно отметить, что во всех случаях раствор имеет щелочные значения pH. В течение первых пяти часов для температур реакции 22 и 60 °С, а для температуры процесса 100 °С — в течение первых двух часов водородный показатель раствора увеличивается, после чего его значение практически стабилизируется. Это определяет равновесное состояние системы при данной температуре.

Анализ позволяет сделать вывод, что равновесная концентрация щелочей в растворе может быть установлена по состоянию системы после пяти ча-

¹ГОСТ Р 70565–2022. Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения коррозионной активности влаги.

²ГОСТ Р 70564–2022. Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения химической стойкости.

сов контакта материала кирпича с водой. Равновесные концентрации в растворе достигаются только гидроксидами щелочных металлов.

На основании результатов проведенных исследований определен температурный коэффициент скорости γ . Температурный коэффициент скорости входит как основание в выражение Вант-Гоффа, описывающее изменение скорости реакции от температуры в виде степенной функции:

$$v_t = \gamma^n \cdot v_0, \quad (1)$$

где $n = \frac{T - T_0}{10}$.

Учитывая результаты экспериментов и сделанных на их основании расчетов, уравнения Вант-Гоффа для равновесных концентраций при протекании реакций гидратации щелочных металлов запишутся следующим образом:

$$C_{\text{NaOH}} = C_{\text{NaOH}}^{22} \cdot 1,23^{\frac{t-22}{10}}; \quad (2)$$

$$C_{\text{KOH}} = C_{\text{KOH}}^{22} \cdot 1,28^{(t-22)/10}; \quad (3)$$

$$C_{\Sigma\text{max}} = C_{\Sigma\text{max}}^{22} \cdot 1,26^{(t-22)/10}. \quad (4)$$

Эти концентрации характерны только для исследуемого образца кирпича и учитываются в расчетах процесса химической деструкции материала.

Исследования процесса взаимодействия щелочи с материалом кирпича проводились при температуре процесса 22, 60 и 100 °С и разной дисперсности пробы кирпича с размерами зерен: 0,18–0,2 мм, 0,45–0,5 мм и 0,9–1,0 мм (рис. 3). Концентрация гидроксида калия в лабораторных исследованиях была равна 0,05, 0,5 и 5,0 н.

На рис. 3 показаны результаты исследования химической деструкции при температуре

100 °С и размере частиц 0,5 мм. Графическое определение коэффициента химической деструкции проводится по значению линейного коэффициента уравнения регрессии и устанавливает скорость деструкции материала кирпича.

На основании данных исследований можно выявить зависимость суммарной скорости процесса химической деструкции, выраженной через коэффициент химической деструкции, от концентрации щелочи. Эта зависимость запишется в виде:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{C_{d_1}}{C_{d_2}} = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{0,374}. \quad (5)$$

Выражение Вант-Гоффа для реакции деструкции материала кирпича запишется следующим образом:

$$v_t = v_{t_0} \cdot 2,89^n, \quad (6)$$

где $n = (t - t_0) / 10$.

Основываясь на результатах исследований и расчете физико-химических показателей протекания процесса химической деструкции материала стеновой керамики, в общем виде значение коэффициента химической деструкции для материала можно записать как функцию температуры и концентрации щелочей:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{\frac{t_0-t}{10}}} \left(\frac{C_{\Sigma\text{max}}}{C_0} \right)^k, \quad (7)$$

где Cd — коэффициент химической деструкции материала; Cd_0 — коэффициент химической деструкции материала, полученный в результате лабораторных исследований при концентрации щелочи $C_0 = 0,5$ н и температуре $t_0 = 100$ °С; γ_2 — температурный коэффициент скорости процесса химической деструкции

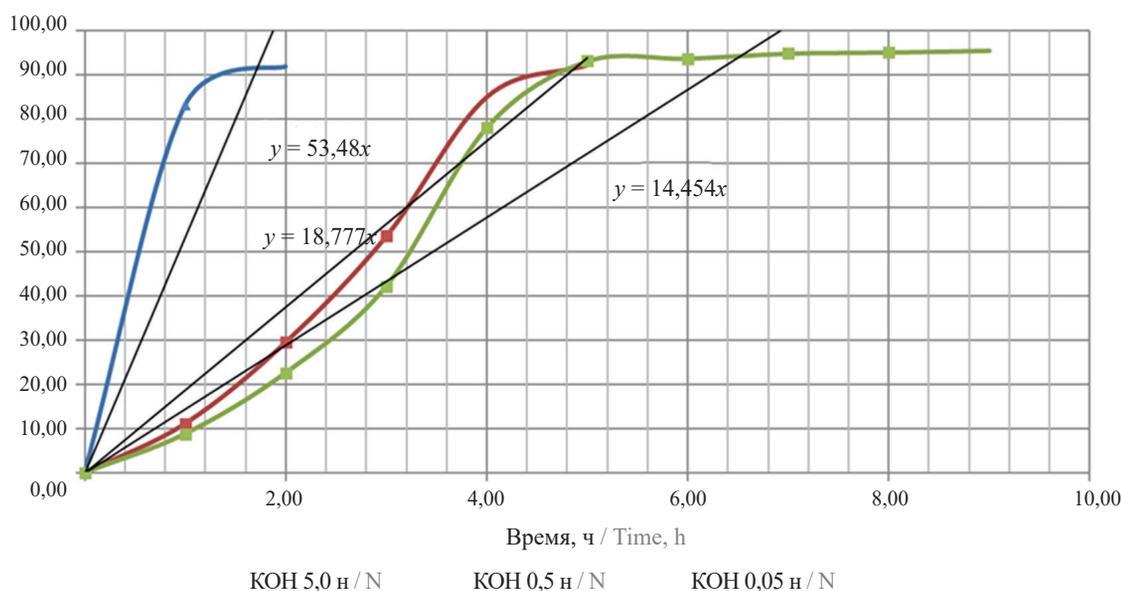


Рис. 3. Результаты исследования химической деструкции при 100 °С и размере частиц 0,5 мм
 Fig. 3. Results of the study of chemical destruction at 100 °С and a particle size of 0.5 mm

в формуле Вант-Гоффа, определенный в результате лабораторных исследований по разработанной методике; t — температура эксплуатации материала; $C_{\Sigma_{\max}}$ — максимальная равновесная концентрация гидроксидов в растворе.

Максимальная равновесная концентрация гидроксидов в растворе для положительных температур зависит от температуры в соответствии с уравнением Вант-Гоффа и определяется по формуле:

$$C_{\Sigma_{\max}} = C_{\Sigma_{\max}}^{22} \cdot \gamma_1^{\frac{t-t_{22}}{10}}, \quad (8)$$

где $C_{\Sigma_{\max}}^{22}$ — максимальная равновесная концентрация, определенная по разработанной методике, при температуре $t = 22$ °С; γ_1 — температурный коэффициент скорости процесса гидратации в формуле Вант-Гоффа, определенный в результате лабораторных исследований по разработанной методике; t_{22} — температура лабораторного эксперимента $t = 22$ °С.

Таким образом, учитывая выражения (7) и (8), коэффициент химической деструкции материала для положительных температур находится по формуле:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{10} \gamma_1^{10}} \left(\frac{\gamma_1^{10} C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{10} \gamma_1^{10}} \left(\frac{\gamma_1^{10} C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k \times \gamma_2^{\frac{t}{10}} \gamma_1^{\frac{t}{10}} = \frac{Cd_0}{\gamma_1^k \gamma_2^k \gamma_1^{10} \gamma_2^{10}} \left(\frac{C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k \cdot (\gamma_2 \gamma_1)^{\frac{t}{10}}. \quad (9)$$

Долговечность материала будет равна:

$$D = \frac{1}{Cd}. \quad (10)$$

Вычисленная в соответствии с приведенной методикой долговечность учитывает индивидуальные физические и химические характеристики материала.

Предложенный подход к исследованию химической коррозии строительной керамики основан на том, что процессы образования щелочей на первой стадии и процессы взаимодействия щелочей с оксидами кремния и алюминия рассматриваются не отдельно по каждой химической реакции, а по их совместному протеканию для определенного конкретного материала.

При этом основной механизм коррозии подтвержден термодинамическими расчетами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены натурные исследования работы материала кирпича в ограждающих конструкциях зданий, возведенных в разные эпохи и в разных климатических зонах. Показано, что прочность и морозостойкость кирпича не могут рассматриваться как определяющий параметр при оценке долговечности работы материала в ограждающих конструкциях.

Сформулирована научная гипотеза о возможности описания деструкции материала кирпича на основании процессов химической коррозии. Поставлена цель определить долговечность материала кирпича при его работе в ограждающих конструкциях во временных единицах. Разработан процесс химической деструкции материала кирпича, включающий три стадии: первую нехимическую стадию увлажнения материала, первую химическую стадию — образование щелочей в материале кирпича и вторую химическую — взаимодействие щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы материала.

Разработаны методики исследования кинетики протекания химических стадий процесса. Введены показатели процесса деструкции и методики их расчета. Проведены исследования кинетики процесса, которые позволили определить константы скорости реакций образования щелочей в материале и реакций взаимодействия щелочи с аморфной частью материала, коэффициенты в уравнениях Вант-Гоффа и Аррениуса, энергию активации процессов.

Разработана теория долговечности материала кирпича и на ее основе методика расчета долговечности материала во временных единицах. Теория долговечности предполагает, что основными силами, приводящими к деструкции материала, являются химические процессы. Данная теория означает, что применявшиеся ранее косвенные определения долговечности материала по прочности и морозостойкости не учитывают наиболее важный параметр — химический состав материала, что приводит к значительным ошибкам в оценке долговечности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Архитектурный архив. I / под ред. Д. Аркина (отв. ред.), Н. Брунова, И. Маца, Д. Сухова, О. Щусева. М. : Изд-во Акад. архитектуры СССР, 1946. С. 52.
2. Смирнов В.Н., Ёлишин Д.Д. Кирпичные клейма Санкт-Петербургской губернии середины XIX – начала XX в. Каталог и исследование // Бюллетень Института истории материальной культуры РАН. 2017. 214 с. EDN YRLOPX.

3. Желдаков Д.Ю., Пономарев О.И., Минаян А.А., Турсуков С.А. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий // Вестник НИЦ Строительство. 2023. № 1 (36). С. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDNZFIKOG.

4. Белелюбский Н.А. Однообразное испытание строительных материалов: Мюнхен, 1884. Дрезден,

1887. СПб. : Типография Министерства путей сообщения, 1888.

5. Подвальный А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 4–6. EDN IBENTJ.

6. Шестоперов С.В. Долговечность бетона. М. : Автотрансиздат, 1955. 480 с.

7. Белозеров Г.А., Бабакин Б.С., Макаров Б.А. Математическое моделирование продолжительности процесса замораживания и плавления эвтектического раствора в аккумуляторах холода // Известия КГТУ. 2011. № 23. С. 141–147. EDN OKLUJZ.

8. Аняньев А.И., Лобов О.И., Можжаев В.П., Вязовеченко П.А. Влияние различных факторов на долговечность конструкций, утепленных пенополистиролом // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 5–9. EDN JXNUBD.

9. Аняньев А.И. Долговечность и теплозащитные свойства наружных кирпичных стен старинных зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2018. № 2. С. 52–57. EDN YRGZXB.

10. Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Ланкин А.В., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Причины разрушения лицевого кирпича // Строительство и реконструкция. 2023. № 1 (105). С. 114–122. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-114-122. EDN RRGJANF.

11. Александровский С.В. Напряжения в пористом теле, возникающие при замерзании жидкой влаги в его порах // Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики : сб. докл. 2003. С. 9–17.

12. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М. : Стройиздат, 1973. 432 с.

13. Артамонова А.В. Вяжущие вещества на основе шлаков электросталеплавильного производ-

ства // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 11–13. EDN OBHCFZ.

14. Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гусев Б.В. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с. EDN UYVZTF.

15. Castellote M., Andrade C. Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (UR-CORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in situ // Revista ingeniería de construcción. 2009. Vol. 24. Issue 3. DOI: 10.4067/s0718-50732009000300003

16. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II // Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. Issue 3. Pp. 275–289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006

17. Jennings H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 1. Pp. 101–116. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00209-4

18. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М. : Стройиздат, 1972. 351 с.

19. Zheldakov D.Yu. The brick material durability in brickwork // AlfaBuild. 2020. No. 3 (15). P. 1504. DOI: 10.34910/ALF.15.4.EDNXSSJKS.

20. Zheldakov D.Yu., Kozlov V.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. Moisture crystallization in bricks // Nanotechnologies in Construction a Scientific Internet-Journal. 2020. Vol. 12. Issue 6. Pp. 305–312. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-305-312

21. Zheldakov D., Mustafin R., Kozlov V., Gay-sin A., Sinitsin D., Bulatov B. Durability control of brickwork's material including operation parameters of the building enclosure // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2021. Vol. 8. Issue 6. Pp. 871–880. DOI: 10.18280/mmep.080605

Поступила в редакцию 21 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Юрьевич Желдаков — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; SPIN-код: 5885-5335, Scopus: 57197842900, ResearcherID: AAX-2291-2020, ORCID: 0000-0002-4629-5583; djeld@mail.ru;

Владимир Трофимович Ерофеев — доктор технических наук, профессор, академик РААСН; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 161483; erofeevvt@bk.ru.

Вклад авторов:

Желдаков Д.Ю. — идея, разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Ерофеев В.Т. — научное руководство, научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Architectural Archive. I / ed. D. Arkina, N. Brunova, I. Matsa, D. Sukhova, O. Shchuseva. Moscow, Publishing House of the Academy of Architecture of the USSR, 1946; 52. (rus.).*
2. Smirnov V.N., Jolshin D.D. Material culture of St. Petersburg. Brick Stamps in Saint Petersburg Province in the Mid-19th – Early 20th Century. A Catalogue and Study. *Bulletin of the Institute for History of Material Culture Ras.* 2017; 214. (rus.).
3. Zheldakov D.Yu., Ponomarev O.I., Minasyan A.A., Tursukov S.A. Durability assessment of brick and stone structures in engineering surveys. *Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2023; 1(36):27-40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDN ZFIKOG. (rus.).
4. Beleyubsky N.A. *Monotonous testing of building materials: Munich, 1884. Dresden, 1887.* St. Petersburg, Printing house of the Ministry of Railways, 1888. (rus.).
5. Podvalny A.M. On the concept of ensuring frost resistance of concrete in the structures of buildings and structures. *Construction Materials.* 2004; 6:4-6. EDN IBENTJ. (rus.).
6. Shestoporov S.V. *Durability of concrete.* Moscow, Avtotransizdat Publ., 1955; 480. (rus.).
7. Belozerov G.A., Babakin B.S., Makarov B.A. Mathematical modeling of the duration of the process of freezing and melting of the eutectic solution in cold accumulators. *News of KSTU.* 2011; 23:141-147. EDN OKLUJZ. (rus.).
8. Ananyev A.I., Lobov O.I., Mozhaev V.P., Vyazovchenko P.A. The influence of various factors on the durability of structures insulated with polystyrene foam. *Housing Construction.* 2003; 3:5-9. EDN JXNUBD. (rus.).
9. Ananyev A.I. Durability and heat-protective properties of external brick walls of ancient buildings. *ABOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermophysics.* 2018; 2:52-57. EDN YRGZXB. (rus.).
10. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Lankin A.V., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. The reasons for the destruction of the face brick. *Building and Reconstruction.* 2023; 1(105):114-122. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-114-122. EDN RGJANF. (rus.).
11. Aleksandrovsky S.V. Stresses in a porous body that arise when liquid moisture freezes in its pores. *Walls and facades. Current problems of building thermal physics : collection of reports.* 2003; 9-17. (rus.).
12. Aleksandrovsky S.V. *Calculation of concrete and reinforced concrete structures for changes in temperature and humidity, taking into account creep.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1973; 432. (rus.).
13. Artamonova A.V. Binders based on slag from electric furnace production. *Construction Materials.* 2011; 5:11-13. EDN OBHCFZ. (rus.).
14. Ivanov F.M., Alekseev S.N., Gusev B.V. *Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 536. EDN UYVZTF. (rus.).
15. Castellote M., Andrade C. Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (UR-CORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in-situ. *Revista ingeniería de construcción.* 2009; 24(3). DOI: 10.4067/s0718-50732009000300003
16. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cement and Concrete Research.* 2008; 38(3):275-289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006
17. Jennings H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. *Cement and Concrete Research.* 2000; 30(1):101-116. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00209-4
18. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosyan O.P. *Thermodynamics of silicates.* Moscow, Stroyizdat, 1972; 351. (rus.).
19. Zheldakov D.Yu. The brick material durability in brickwork. *AlfaBuild.* 2020; 3(15):1504. DOI: 10.34910/ALF.15.4.EDNXSSJKS.
20. Zheldakov D.Yu., Kozlov V.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. Moisture crystallization in bricks. *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal.* 2020; 12(6):305-312. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-305-312
21. Zheldakov D., Mustafin R., Kozlov V., Gay-sin A., Sinitsin D., Bulatov B. Durability control of brickwork's material including operation parameters of the building enclosure. *Mathematical Modeling of Engineering Problems.* 2021; 8(6):871-880. DOI: 10.18280/mmep.080605

Received October 21, 2023.

Adopted in revised form on October 28, 2023.

Approved for publication on November 21, 2023.

B I O N O T E S : **Dmitriy Yu. Zheldakov** — Candidate of Technical Sciences, leading researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN);** 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 5885-5335, Scopus: 57197842900, ResearcherID: AAX-2291-2020, ORCID: 0000-0002-4629-5583; djeld@mail.ru;

Vladimir T. Erofeev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 161483; erofeevvt@bk.ru.

Contribution of the author:

Dmitriy Yu. Zheldakov — idea, development of techniques, processing of material, writing an article.

Vladimir T. Erofeev — scientific guidance, scientific editing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.61

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.403-414

Экологизация негативных факторов деятельности предприятий и организаций

Елена Эдуардовна Смирнова¹, Михаил Юрьевич Слесарев²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Экологическая сертификация в соответствии с ISO 14001 и EMAS позволяет понять и оценить воздействие хозяйственной деятельности на экосистемы, а также установить экологические цели и задачи улучшения деятельности предприятий и организаций. Эффекты EMS зависят от того, как компании решат их использовать после сертификации. Исследуются проблемы организационного климата, связанные с использованием стандартов серии ISO 14000 и EMAS для повышения экологической эффективности компаний.

Материалы и методы. Методика представлена в виде модели экологической безопасности деятельности предприятий и организаций, в том числе — экологического аудита, экологической стандартизации и экологической оценки соответствия различным экологическим требованиям на разных уровнях организации деятельности предприятий. Объект исследования — международные экостандарты серии ISO 14000 и EMAS. Предмет исследования — экологическая безопасность негативных факторов деятельности предприятий и организаций. Предлагается концепция необходимости обучения персонала и создания позитивно экологически ориентированного организационного климата предприятий и организаций.

Результаты. Реализация EMS не всегда приводит к улучшению экологических показателей. Некоторые компании сосредотачиваются на формальных критериях без учета реальных экологических проблем. Также экологические показатели могут иметь форму коэффициентов и быть улучшены при неизменном или даже ухудшившемся воздействии на окружающую среду. Для реализации целей EMS важен организационный климат, особенно отношение сотрудников к окружающей среде и экологическим ценностям. Несмотря на ограничения, EMS, экологический аудит и принципы ISO 14000 могут помочь компаниям уменьшить отрицательное влияние на экосистемы, повысить конкурентоспособность и сделать более осознанный выбор при планировании своей деятельности.

Выводы. Подчеркивается значимость создания организационного климата для экологической безопасности негативных факторов деятельности предприятий и организаций. Также необходима более точная оценка эффективности экологических мероприятий при формулировании экологических стандартов и оценке соответствия их выполнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологическая сертификация, экологический аудит, экологическая стандартизация, экологическая оценка, экологические требования, организационный климат организации, система экологического менеджмента, стандарты серии ISO 14000, EMAS, экологизация, экологическая безопасность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Смирнова Е.Э., Слесарев М.Ю. Экологизация негативных факторов деятельности предприятий и организаций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 403–414. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.403-414

Автор, ответственный за переписку: Елена Эдуардовна Смирнова, esmirnovae@yandex.ru.

Greening negative factors in the activities of enterprises and organizations

Yelena E. Smirnova¹, Mikhail Yu. Slesarev²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Environmental certification in accordance with ISO 14001 and EMAS makes it possible to understand and assess the impact of economic activities on ecosystems, as well as to set environmental goals and objectives for improving the activities of enterprises and organizations. The effects of the EMS (environmental management and audit scheme) depend on how companies decide to use them after certification. In this regard, the authors investigate the organizational climate issues associated with the use of ISO 14000 and EMAS series standards to improve the environmental efficiency of companies.

Materials and methods. The methodology is presented in the form of an environmental safety model related to the enterprises and organizations, including environmental audit, environmental standardization and environmental assessment of compliance with various environmental requirements at different levels of organization of enterprises' activities.

The object of research is the international environmental standards of the ISO 14000 and EMAS series. The subject of the study is the environmental safety of negative factors in the activities of enterprises and organizations. The concept of the necessity of greening personnel training and a positively environmentally oriented organizational climate in enterprises and organizations is proposed.

Results. The implementation of EMS does not always lead to an improvement in the environmental performance of companies. Some companies focus on formal criteria without taking into account real environmental problems. In addition, environmental indicators can take the form of coefficients and can be improved with unchanged or even worsened environmental impact. The organizational climate is important for the realization of EMS goals, especially the attitude of employees to the environment and environmental values. Despite limitations, EMS, environmental audit and ISO 14000 principles can help companies reduce their negative impact on the environment and increase their competitiveness, as well as make more informed choices when planning their activities.

Conclusions. The importance of creating an organizational climate for the successful greening of negative factors in the activities of enterprises and organizations is emphasized. There is also a need for a more accurate assessment of the effectiveness of environmental measures when formulating environmental standards and assessing compliance with their implementation.

KEYWORDS: environmental certification, environmental audit, environmental standardization, environmental assessment, environmental requirements, organizational climate of the organization, environmental management system, ISO 14000 series standards, EMAS, greening, environmental safety

FOR CITATION: Smirnova Ye.E., Slesarev M.Yu. Greening negative factors in the activities of enterprises and organizations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):403-414. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.403-414 (rus.).

Corresponding author: Yelena E. Smirnova, esmirnovae@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в мире более 57 000 компаний используют стандартизированные схемы экологического менеджмента (СЭМ) (environmental management and audit scheme — EMAS), ожидается, что это число будет расти [1]. Многие компании, органы власти и частные лица считают сертификацию в соответствии с ISO 14001 и EMAS гарантией высоких экологических показателей, так как она позволяет понять и оценить воздействие хозяйственной деятельности на экосистемы, а также установить экологические цели и задачи. Данные стандарты дают возможность компаниям на систематической и структурированной основе разрабатывать экологическую политику и осуществлять управление окружающей средой. Так, с помощью EMAS и ISO 14001 можно сократить выбросы углерода энергоемких предприятий в краткосрочной и особенно долгосрочной перспективе [2].

Практика СЭМ приводит к различным экологическим преимуществам: сокращению и более эффективному использованию ресурсов [3], внедрению передовых методов управления окружающей средой в отношении экологичного дизайна продукции (green product design), закупок, производства, логистики и упаковки [4]. Кроме того, EMS (environmental management system) позволяет компаниям снизить выбросы [5] и риск экологических аварий, повысить безопасность хозяйственной деятельности [6], развивать возможности экологических инноваций [7], решать проблемы, связанные с технологиями и процедурами обеспечения безопасности [8].

Что касается системы управления качеством (quality management system — QMS), в рамках сертификации она может сократить количество отходов

и привлечь инновации для решения экологических проблем, главным образом для управления устойчивыми цепочками поставок [9]. Управление качеством способствует достижению более высоких показателей эффективности в области экологической безопасности. QMS и EMS дают возможность компаниям достигать улучшенных экологических, социальных и управленческих показателей (environmental, social and governance — ESG), являясь подходящими бизнес-инструментами для удовлетворения требований заинтересованных сторон в сфере стандартов устойчивости [10]. Их внедрение ведет к позитивным изменениям в деле контроля негативного воздействия, исходящего от хозяйственной деятельности организаций [11].

Таким образом, с одной стороны, сертификацию EMS можно использовать для структурирования и укрепления экологических усилий компаний снизить воздействие на окружающую среду. С другой стороны, формулировки указанных стандартов весьма расплывчаты, и их можно интерпретировать и применять по-разному. Сертификация может привести к различным результатам [12]. Стандартизированная EMS не гарантирует сиюминутного улучшения экологических показателей. Можно даже сказать, она определенно не снижает негативное воздействие на окружающую среду. Разумеется, можно пройти сертификацию и зарегистрироваться без особых улучшений. Но эффекты EMS в очень большой степени зависят от того, как компании решат их использовать после сертификации [13, 14].

Несмотря на обширную литературу, академическим исследованиям по ISO 14001 и EMAS не хватает адекватных теоретических обобщений, которые имеют решающее значение для оценки текущего состояния знаний и определения путей для будущих исследований.

Цель исследования заключается в том, чтобы показать важность организационного климата фирмы в реализации EMS. Исследуются проблемы, связанные с использованием стандартов ISO 14001 и EMAS для повышения экологической эффективности компаний.

Решаются следующие задачи:

- анализируются возможные проблемные аспекты, связанные с использованием данных стандартов;
- идентифицируются причины возникновения проблем экологической безопасности деятельности предприятий и организаций;
- дается осмысление необходимости экообучения персонала и создания позитивного организационного климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье используется следующая модель экологической стандартизации и различных уровней экологической безопасности организации. В центре модели по важности развития организационного климата находится (1) сотрудник со своими ценностями и установками как условиями его деятельности [15]. Следующий уровень (2) микросистема: его коллеги и руководитель. Далее (3) корпоративная система, т.е. организационный климат, обязанности и стратегия, а в крупных компаниях к этому уровню относятся еще и другие факторы (время, ресурсы, высшее руководство). В сертифицированных компаниях нормативы экологической сертификации служат частью корпоративной системы. Однако в несертифицированных компаниях это часть (4) макросистемы, включающей заинтересованные стороны в качестве акционеров, сотрудников, поставщиков, клиентов или членов более широкого сообщества, которые могут быть затронуты экологическими последствиями деятельности организации. Когда экологические ценности и отношение сотрудника к окружающей среде соответствуют практике, предписанной системой сертификации, и гармонируют с организационным климатом и выбранной стратегией, сертификация способствует экологизации негативного воздействия компании. Напротив, когда сотрудник сталкивается с конфликтом между своими ценностями и сертификационными требованиями, возникшее напряжение приводит к разочарованию и препятствует целям экологического регулирования. Рассматриваемый диссонанс — не просто отрицание или полное отсутствие гармонизации, это привативная, весьма ограниченная и ущербная форма указанной гармонии, мешающая сотруднику принять ценности сертификации в качестве собственных и не способствующая изменению экологической практики фирмы. Соответственно, исходный пассивный (фоновый), низкий и эффективный (полный) виды экологизации, имеющей своим результатом применение международных стандартов для

подтверждения соответствия продукции требованиям технических регламентов, являются различными этапами на пути повышения безопасности и защиты окружающей среды. Центристское становление организационного климата отвечает целям максимальной экологизации. Напротив, центробежная направленность сохранить консервативную тенденцию в области показателей экологической деятельности не способствует экологизации, выступая источником возрастающего организационного диссонанса (рис. 1).

На уровне пассивной (фоновой) экологизации у сотрудников имеют место конфликтующие убеждения и ожидания, приводящие к когнитивному несоответствию и дефициту желания поместить систему сертификации на системный (центральный) уровень, преобладает стремление перенести ее реализацию на более поздний срок, возникают условия для внутренней дисгармонии (1); данное обстоятельство становится причиной эмоционального дискомфорта — диссонанса, что сказывается на принятых ценностях и установках (происходит что-то не то, время растрачивается не так, как следует, личные убеждения не соответствуют требованиям схемы сертификации) (2); персонал все же мотивирован уменьшить диссонанс, преодолеть разочарование и принять ценность экологических нормативов, которая всякий раз непосредственным образом сообщая (публично) воспринимается всеми присутствующими работниками с целью создания оптимального организационного климата (3); применяются различные стратегии для уменьшения несоответствия и диссонанса посредством образования и предоставления соответствующей информации, сотрудники убеждаются на практике, что они с пользой распоряжаются временем с целью достичь максимальной экологизации компании: их время потрачено не зря, их текущая деятельность отвечает актуальным задачам принятой стандартизации (4) [16]. Очевидно, что вложенные ресурсы, затраченное время и деятельность работников должны приводить к усилению рыночных эффектов. Любой разрыв между ними порождает диссонанс и фрустрацию у персонала фирмы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По словам T. Daddi и соавт., через 2 года после регистрации EMAS у 50 % компаний показатели экологической эффективности имели худшие значения, чем за 2 года до принятия EMAS, в то время как показатели улучшились только в 39 % компаний [17]. M. Wagner не обнаружил существенных различий в энергоэффективности между фирмами с EMAS и ISO 14001 и без них ни в 2001 г., ни в период 1991–2001 гг. [18]. Проведенный сравнительный анализ показал, что, например, между индексом экосистемного благополучия EWI (Ecosystem Welfare Index), обычно применяемым для качествен-

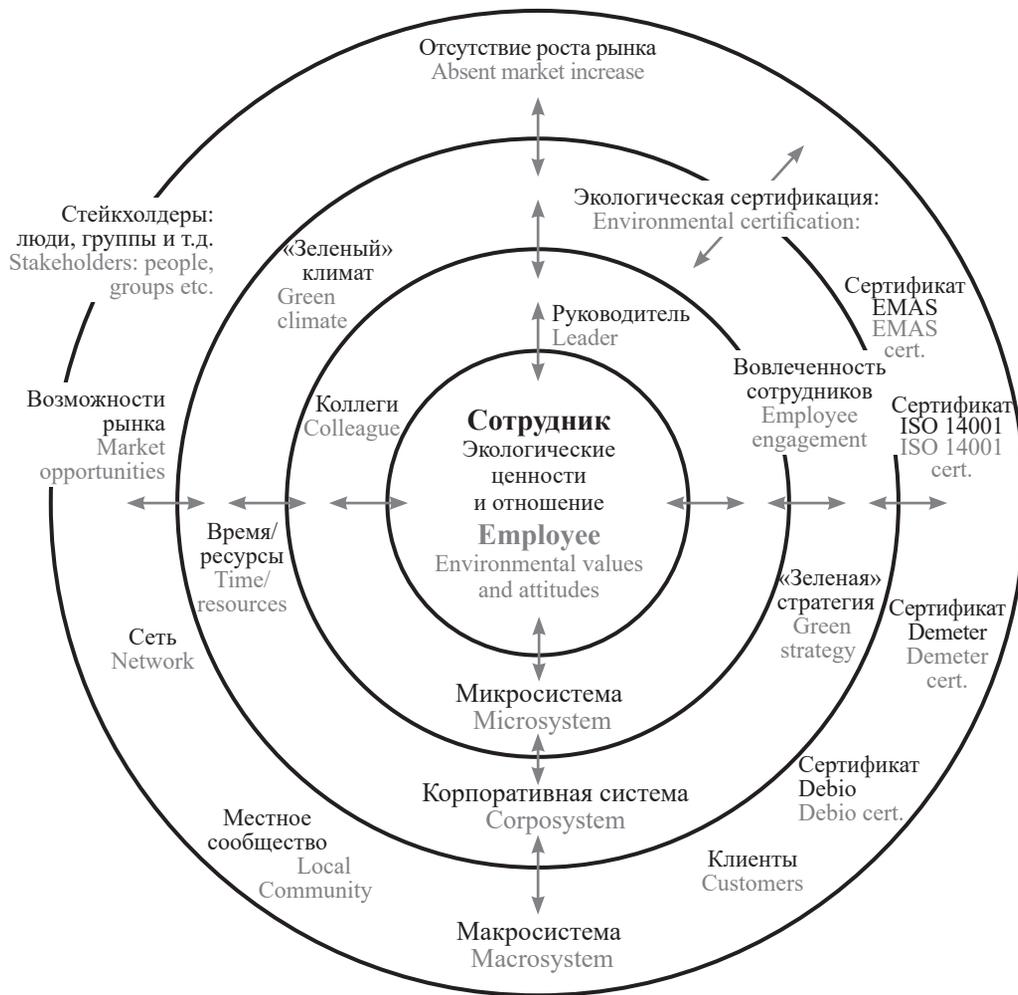


Рис. 1. Системный подход к модели экологической сертификации

Fig. 1. A systematic approach to the environmental certification model

ной характеристики экологической ситуации во всех странах как сводного показателя ресурсопотребления, состояния земель, вод, атмосферного воздуха и биоразнообразия, и числом выданных сертификатов на системы экологического менеджмента какая-либо зависимость отсутствует [19]. Стандарты ISO и EMAS не требуют большего от экологических показателей, нежели соблюдения правил и постоянного совершенствования на основе самостоятельно определенных целей. Сертификация часто является самоцелью без долгосрочных обязательств по охране окружающей среды. По сути дела, тенденции развития процессов экологической сертификации отвечают нормам простой унификации поведения в сфере управления.

Без сомнения, аудит можно использовать для структурирования и укрепления экологических усилий компании. Многие организации добились значительного снижения воздействия на окружающую среду. Поскольку требования стандартов сформулированы неточно (например, не существует заранее определенных правил, касающихся того, какие химические вещества или материалы могут использоваться, или не совсем ясно, необходимо ли со-

блюдение требований законодательства и т.д.), а компаниям и внешним аудиторам, проверяющим, как происходит постоянное улучшение экопоказателей, остается лишь договариваться о конкретных оценках экологизации компании, постольку программа внутреннего аудита устанавливает степень безопасности и тем самым помогает определить ключевые приоритеты в природоохранной деятельности [20, 21].

Стандарты требуют постоянного улучшения экологических характеристик. Это означает непрерывный, год за годом, процесс совершенствования измеримых результатов EMS, связанных с контролем значимых экологических аспектов, на основе политики экологической безопасности организации, ее целей и задач. Очевидно, что усилия компании сконцентрированы на улучшении общей производительности и гармонизации заключаемых соглашений, договоров и контрактов с техническими регламентами на продукцию. Однако использование указанных ISO-документов в качестве условий контрактов (договоров) является неурегулированным и противоречивым. В стандартах не упоминается, должны ли проводимые мероприятия быть направ-

лены на существенные аспекты экологической сертификации [22].

Стандарт ISO 14031 из серии ISO 14000, включающий руководство по оценке экологических показателей и в большей степени связанный с реализацией EMS, предлагает использование показателей эффективности управления (management performance indicators — MPIs) и показателей эффективности деятельности (operational performance indicators — OPis). Цель ISO 14031 — помощь в оценке экологической эффективности (environmental performance evaluation — EPE), определяемой как процесс, облегчающий принятие управленческих решений в отношении экологической эффективности организации путем выбора показателей, сбора и анализа данных, оценки информации по критериям экологической эффективности, отчетности и обмена информацией, с возможностью пересмотра и улучшения данного процесса.

Однако формулировки стандартов на самом деле могут быть истолкованы так, что улучшаться должны именно системы управления, а не экологические показатели [23]. Поскольку цели часто формулируются в виде соотношений (коэффициентов), постольку можно объявить, что постоянное улучшение достигнуто. Парадокс состоит в том, что при достигнутом улучшении увеличивается общее негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому важно прояснить требование постоянного улучшения.

С экологической точки зрения разработка индикаторов для освещения и оценки природоохранных мероприятий кажется привлекательной и достойной похвалы. В то же время представляется актуальным вопрос о том, какое постоянное улучшение, если оно вообще есть, EMS гарантирует [24]. Принимая во внимание общую цель ISO 14001, заключающуюся в поддержке защиты окружающей среды и предотвращении загрязнения, основное внимание следует уделять характеристикам, тесно связанным с воздействием на окружающую среду. Речь идет об инвестиционном замысле и намерениях организации, обосновании инвестиций (предпроектной стадии) и подготовке технико-экономического обоснования (проектной стадии). В данном плане инициативное отношение сотрудника к окружающей среде и экологическим ценностям, организационный климат непосредственно обеспечивают внедрение принципов, заложенных в стандартах ISO серии 14000, и способствуют экологизации фирмы. Ведь демонстрация персоналом экологической приверженности своей фирмы оказывается чуть ли не решающим условием доверия партнеров к ее природоохранной деятельности. Внедрение систем экологического менеджмента позитивно сказывается на конкуренции с другими компаниями и приносит заметные экономические преимущества в рамках корпоративной экологической политики.

Поскольку экологические характеристики негативного воздействия на экосистемы практически не отражаются на интенсивности процессов сертификации систем экологического менеджмента, то применение различных стратегий для уменьшения несоответствия и диссонанса внутри фирмы становится в известном смысле неизбежным. Среди них экологический аудит с целью достичь максимальной экологической безопасности компании (как при реализации проектов и технико-экономических обоснований строительства и эксплуатации хозяйственных сооружений, так и действующих предприятий) и создать надлежащий организационный климат для сотрудников как важнейшее условие улучшения экологических индексов [25].

Экологический аудит ISO 14010 «Руководство по экологическому аудиту — Общие принципы экологического аудита» включает следующие этапы: определение целей и области применения аудита; планирование аудита; разработку программы аудита и выбор методов; проведение аудита; оценку результатов аудита; подготовку отчета об аудите; систематизацию и управление полученной информацией. Однако имеются некоторые общие проблемные места, касающиеся аудита. Ввиду того, что компании обычно работают с ограниченным числом целей, они контролируют лишь небольшую часть экологических показателей. Как следствие, некоторые компании проводят аудиты без должного понимания реальных экологических проблем, с которыми они сталкиваются. Например, они могут сосредоточиться на соблюдении нормативно-технических требований по утилизации отходов, тогда как на самом деле главной проблемой должно быть уменьшение объема отходов в принципе. Кроме того, экологические показатели часто имеют форму коэффициентов и могут быть улучшены в свете требования о постоянном улучшении при неизменном (или даже ухудшившемся) воздействии на окружающую среду. Другие компании ориентируются исключительно на формальные критерии, которые не отражают всего многообразия проблем и перспектив улучшения экологической безопасности.

Принципы экологического аудита помогают компаниям проводить более эффективный контроль за своей деятельностью и уменьшать отрицательное влияние на окружающую среду. Многие мелкие фирмы не пытаются предпринимать систематические усилия по охране окружающей среды, а некоторые даже не рассматривают вопросы своей экологизации. Но малые и средние предприятия могут объединиться в сети для проведения сертификации (модель Hackefors) [22]. Например, если они перейдут на централизованное теплоснабжение, это позволит сократить выбросы углекислого газа, оксидов азота и диоксида серы. Ключевые принципы экологического аудита помогают компаниям сделать

более осознанный выбор при планировании своей деятельности и повысить конкурентоспособность.

Хотя принципы ISO 14010 направлены на улучшение качества экологического аудита и контроля деятельности компаний и организаций, они не всегда однозначны и могут быть интерпретированы по-разному экспертами в области экологического аудита, что может привести к недостаточной прозрачности процесса. Принципы ISO 14010 охватывают только экологический аудит и не регулируют другие аспекты деятельности компаний, которые также могут оказывать негативное влияние на окружающую среду, такие как промышленные выбросы, отходы и загрязнение воды. Положения ISO 14010 не предоставляют конкретных требований или стандартов, которые должны быть выполнены при проведении экологического аудита, о чем уже было сказано. Отсюда очевидно, что принципы ISO 14010 не гарантируют, что результаты экологического аудита будут использоваться компаниями для улучшения своей экологической безопасности. Компании могут не реагировать на результаты аудита или игнорировать рекомендации экологического аудитора [26].

В результате анализа следует выделить ряд проблемных мест экологизации компаний.

1. Имеет место несоответствие между требованиями стандартов ISO 14001 и EMAS и реальными экологическими показателями компаний. Стандарты не регулируют все аспекты деятельности компаний с их негативным влиянием на окружающую среду. Общепринятый метод измерения и оценки экологических показателей отсутствует. Неточность формулировок стандартов, как правило, приводит к недостаточной прозрачности процесса экологического аудита [2].

2. Каждое требование может быть интерпретировано по-разному, что становится причиной диссонанса среди персонала и препятствует экологизации компании [27].

3. Проблема постоянного улучшения экологических показателей усложняет оценку и аудит результатов сертификации. Компании, улучшая формальные показатели, например, индексы состояния отдельных элементов окружающей среды, поощряются партнерами по бизнесу и общественным мнением при неизменном или даже ухудшившемся воздействии на окружающую среду. Не существует общепринятого метода измерения или оценки экологических показателей, что усложняет проблему оценки параметров, касающихся не только экологической эффективности, но и управленческих усилий. В мире насчитываются сотни протокольных систем, имеющих право сертифицировать EMS на соответствие стандарту ISO 14001 и EMAS, но только всемирно известные компании (Lloyd's Register Quality Assurance, SGS, DNV, NSAI, BVQI, TUV, AENOR и ряд других) определяют цели и по-

рядок аккредитации по сертификации как систем EMS, так систем менеджмента качества QMS и т.д. (например, страхованию, сертификации продукции и услуг). Учитывая, что сертификация как вид коммерческой деятельности на рынке соответствующих услуг связана с непредсказуемостью конкурентной борьбы, данное затруднение не позволяет оценить влияние компании на окружающую среду в целом [28].

4. Компании проводят аудиты без должного понимания реальных экологических проблем, с которыми они сталкиваются. Некоторые аудиторы не обладают необходимыми знаниями и опытом в области экологии и аудита [29, 30].

5. Независимые аудиторы должны быть действительно независимы и объективны. Однако это не всегда выполняется, что противоречит требованию о прозрачности экологической оценки. Важным оказывается выбор органа сертификации, известного в определенном регионе мира, на который ориентирована деятельность сертифицируемого предприятия, или в определенной отрасли экономики, к которой оно относится.

6. Необходимо правильное обучение персонала, чтобы создать позитивный организационный климат и поддерживать экологические и устойчивые процессы. Если у сотрудников преобладают конфликтующие убеждения и ожидания, это вызывает когнитивное несоответствие и фрустрацию, что мешает экологизации фирмы.

7. Незначительная разница между компаниями, которые улучшили один показатель, и компаниями, которые интегрировали экологические вопросы в свои бизнес-стратегии и смогли снизить общее воздействие на окружающую среду, может быть несправедливо оценена в пользу использования ISO-сертификации или регистрации EMAS. Важно учитывать также другие факторы, такие как эффективный отвод основных загрязняющих веществ и достижение устойчивости производства. Субъекты хозяйственной деятельности всякий раз должны доказывать свою экологическую безопасность, невиновность в той или иной экологической ситуации, принимать меры по предотвращению или возмещению ущерба окружающей среде.

Таким образом, использование стандартов ISO 14001 и EMAS может представлять некоторые сложности, которые нужно учитывать при их применении.

Для понимания сути EMS нужно выйти за рамки того факта, что компания имеет соответствующую сертификацию. Возможно по-разному интерпретировать каждое требование ISO 14001, 14010, 14031 и EMAS, особенно в отношении постоянных улучшений. ISO-сертификация или EMAS-регистрация фактически не делают различия между компанией, улучшившей один показатель, и компанией, которая интегрировала вопросы охраны окружающей среды в свои основные бизнес-

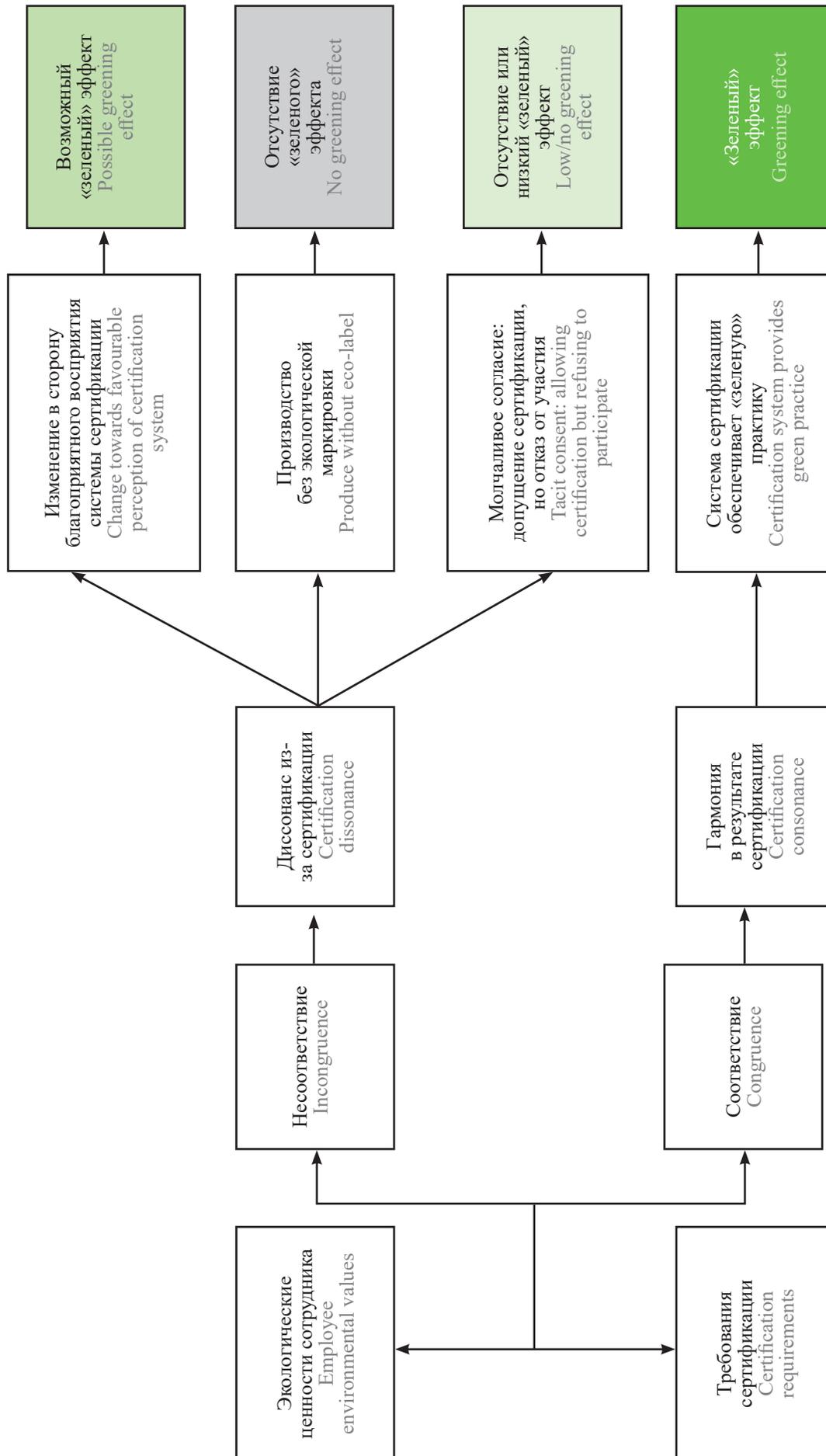


Рис. 2. Сертификационная модель диссонанса и консонанса в экологизации компании

Fig. 2. Certification model of dissonance and consonance in the greening of the company

стратегии и смогла снизить общее воздействие на окружающую среду. Как показывает мировая практика, неспособность компании доказать свою экологическую безопасность порождает недоверие к ее природоохранной деятельности и служит основанием для последующего выдвижения обвинений в нарушении общепринятых требований. Поэтому важно обратить внимание на изменение инфраструктуры EMS, сутью которой выступает позитивный организационный климат. Именно он позволяет устранить несоответствие относительно того, реализованы ли только экологические параметры или классические бизнес-параметры оценки, чтобы определить, какие аспекты являются значимыми. Если на уровне пассивной (фоновой) экологизации у сотрудников преобладают конфликтующие убеждения и ожидания, приводящие к когнитивному несоответствию и фрустрации, то, при наличии желания поместить систему сертификации на системный (центральный) уровень, заложенный в EMS потенциал экологизации будет успешно раскрыт, и фирма сможет постоянно доказывать эффективность систем экологического управления. Если персонал понимает, каков масштаб административных усилий и финансовых затрат, какие экологические аспекты определила компания и связанные с ними воздействия на экосистему, какие аспекты считаются значительными и почему, какие индикаторы были отобраны для мониторинга каждого существенного аспекта и развития стратегии экопоказателей, то экологизация компании обеспечит «зеленую» практику [31]. Экологические ценности сотрудников, а также их экологическое образование, пожалуй, выступают главными и четкими мотивами того, было или будет ли выполнено требование постоянного улучшения. Сертификационная модель диссонанса и консонанса в экологизации компании представлена на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данный подход представляет собой анализ требований стандарта EMS и экологического аудита, а также проблем, связанных с их внедрением компаниями. Результаты исследования показывают, что сертификация EMS и прохождение экологического аудита являются важными инструментами

(в некоторых случаях едва ли не единственными) для компаний в направлении устойчивого развития и повышения экологической эффективности своей деятельности.

Для обеспечения эффективности улучшения экологических показателей необходимо уделять внимание не только выполнению требований стандартов, но и созданию внутренней инфраструктуры компаний, которая сможет обеспечить позитивный организационный климат и вовлеченность персонала в процессы экологизации хозяйственной деятельности. Это является ключевым фактором, который определяет успешность внедрения стандарта EMS и прохождения экологического аудита.

Также анализ указывает на проблемы, связанные с неоднозначностью и интерпретацией требований стандартов, что требует более ясной формулировки и уточнения со стороны регулирующих органов. Другой проблемой является возможность игнорирования компаниями результатов экологического аудита или отсутствие реакции на экологически ориентированные рекомендации аудитора.

Таким образом, из анализа следует, что сертификация EMS и прохождение экологического аудита могут быть эффективными методами для компаний в направлении устойчивого развития и повышения экологической безопасности. Однако для достижения целей улучшения экологических показателей необходимо, прежде всего, обращать внимание на создание и обновление внутренней инфраструктуры компаний, которая будет обеспечивать исходный позитивный организационный климат и вовлеченность персонала в проблемы экологической безопасности. Нужно больше внимания уделить ясному формулированию требований стандартов и контролю за их выполнением, чтобы обеспечить точную оценку эффективности экологических мероприятий компаний. Разумеется, подготовка и прохождение предприятием сертификации EMS сопряжены с определенными затратами, но без учета организационного климата фирмы данный процесс будет чисто формальным результатом и направлен на решение лишь национальных экологических проблем в той мере, в какой они отражены в национальном законодательстве, а руководство и персонал не смогут продемонстрировать свою невиновность в негативном воздействии на окружающую среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ammenberg J., Sundin E.* Products in environmental management systems: Drivers, barriers and experiences // *Journal of Cleaner Production*. 2005. Vol. 13. Issue 4. Pp. 405–415. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2003.12.005
2. *Testa F., Rizzi F., Daddi T., Gusmerotti M., Frey M., Iraldo F.* EMAS and ISO 14001: The differ-

ences in effectively improving environmental performance // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 68. Pp. 165–173. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.12.061

3. *Budi I.Y., Karuniasa M., Nurcahyo R.* Effectiveness of ISO 14001: 2015 implementation in small and medium enterprises (case study: a laundry machine industry SME in Bantul Yogyakarta) // *IOP Confer-*

- ence Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 423. Issue 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/423/1/012010
4. *Wong C.W., Wong C.Y., Boon-itt S.* Environmental management systems, practices and outcomes: Differences in resource allocation between small and large firms // *International Journal of Production Economics*. 2020. Vol. 228. P. 107734. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107734
 5. *Bravi L., Santos G., Pagano A., Murmura F.* Environmental management system according to ISO 14001:2015 as a driver to sustainable development // *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2020. Vol. 27. Issue 6. Pp. 2599–2614. DOI: 10.1002/csr.1985
 6. *Montobbio F., Solito I.* Does the eco-management and audit scheme foster innovation in European firms? // *Business Strategy and the Environment*. 2018. Vol. 27. Issue 1. Pp. 82–99. DOI: 10.1002/bse.1986
 7. *Younis H., Sundarakani B.* The impact of firm size, firm age and environmental management certification on the relationship between green supply chain practices and corporate performance // *Benchmarking: An International Journal*. 2019. Vol. 27. Issue 1. Pp. 319–346. DOI: 10.1108/BIJ-11-2018-0363
 8. *Смирнова Е.Э.* Анализ и управление рисками в российских и международных стандартах безопасности // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2023. Т. 13. № 2. С. 336–347. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-336-347. EDNEARQBL.
 9. *Zimon D., Madzik P., Dellana S., Sroufe R., Ikram M., Lysenko-Ryba K.* Environmental effects of ISO 9001 and ISO 14001 management system implementation in SSCM // *The TQM Journal*. 2021. DOI: 10.1108/TQM-01-2021-0025
 10. *Heras-Saizarbitoria I., Boiral O., de Junguaitu A.D.* Environmental management certification and environmental performance: Greening or greenwashing? // *Business Strategy and the Environment*. 2020. Vol. 29. Issue 6. Pp. 2829–2841. DOI: 10.1002/bse.2546
 11. *Ronalter L.M., Bernardo M., Romani J.M.* Quality and environmental management systems as business tools to enhance ESG performance: a cross-regional empirical study // *Environment, Development and Sustainability*. 2022. Vol. 25. Issue 9. Pp. 9067–9109. DOI: 10.1007/s10668-022-02425-0
 12. *Arimura T.H., Hibiki A., Katayama H.* Is a voluntary approach an effective environmental policy instrument? // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2008. Vol. 55. Issue 3. Pp. 281–295. DOI: 10.1016/j.jeem.2007.09.002
 13. *Valenciano-Salazar J.A., Andre F.J., Martín-de Castro G.* Sustainability and firms' mission in a developing country: The case of voluntary certifications and programs in Costa Rica // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2022. Vol. 65. Issue 6. Pp. 2029–2053. DOI: 10.1080/09640568.2021.1950658
 14. *García-Álvarez M., de Junguaitu A.D.* Shedding light on the motivations and performance of the eco-management and audit scheme (EMAS) // *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 99. P. 107045. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107045
 15. *Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J.* Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017
 16. *Hinojosa A.S., Gardner W.L., Walker H.J., Cogliser C., Gullifor D.* A review of cognitive dissonance theory in management research // *Journal of Management*. 2017. Vol. 43. Issue 1. Pp. 170–199. DOI: 10.1177/0149206316668236
 17. *Daddi T., Magistrelli M., Frey M., Iraldo F.* Do environmental management systems improve environmental performance? Empirical evidence from Italian companies // *Environment, Development and Sustainability*. 2011. Vol. 13. Issue 5. Pp. 845–862. DOI: 10.1007/s10668-011-9294-8
 18. *Wagner M.* The influence of ISO 14001 and EMAS certification on environmental and economic performance of firms: An empirical analysis // *Environmental Management Accounting — Purpose and Progress*. 2003. Pp. 367–386. DOI: 10.1007/978-94-010-0197-7_16
 19. *Svensson E., Andersson K.* Inventory and evaluation of environmental performance indices for shipping. Report No R 11:132. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2011. 71 p.
 20. *Rajesh R.* Exploring the sustainability performances of firms using environmental, social, and governance scores // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 247. P. 119600. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119600
 21. *Broadstock D.C., Chan K., Cheng L.T.W., Wang X.* The role of ESG performance during times of financial crisis: Evidence from COVID-19 in China // *Finance Research Letters*. 2021. Vol. 38. P. 101716. DOI: 10.1016/j.frl.2020.101716
 22. *Ammenberg J.* Do standardised environmental management systems lead to reduced environmental impacts? // *Ser.: Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations*. Linköping : Linköping University, 2003. 109 p.
 23. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* Проблема и решение системы оценки экологической безопасности строительства в мегаполисе // *Экология урбанизированных территорий*. 2013. № 1. С. 13–17. EDN PZTSLL.
 24. *Slesarev M.* Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies // *E3S Web of Conferences*.

2021. Vol. 258. P. 09084. DOI: 10.1051/e3sconf/2021-25809084

25. Heras-Saizarbitoria I., García M., Boiral O., de Junguitu A.D. The use of eco-efficiency indicators by environmental frontrunner companies // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 115. P. 106451. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106451

26. Smirnova E. Problems of ecology and ensuring environmental safety in relation to toxic “Krasny Bor” dump site // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 175. P. 14015. DOI: 10.1051/e3sconf/202017514015

27. Flagstad I., Hauge A.L., Johnsen S.Å.K. Certification dissonance: Contradictions between environmental values and certification scheme requirements in small-scale companies // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 358. P. 132037. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132037

28. Fagioli F.F., Paolotti L., Boggia A. Trends in environmental management systems research. A content

analysis // *Environmental and Climate Technologies*. 2022. Vol. 26. Issue 1. Pp. 46–63. DOI: 10.2478/rtucte-2022-0005

29. Todaro N.M., Daddi T., Testa F., Iraldo F. Organization and management theories in environmental management systems research : a systematic literature review // *Business Strategy & Development*. 2020. Vol. 3. Issue 1. Pp. 39–54. DOI: 10.1002/bsd2.77

30. Erauskin-Tolosa A., Zubeltzu-Jaka E., Heras-Saizarbitoria I., Boiral O. ISO 14001, EMAS and environmental performance: A meta-analysis // *Business Strategy and the Environment*. 2020. Vol. 29. Issue 3. Pp. 1145–1159. DOI: 10.1002/bse.2422

31. Смирнова Е.Э. Оценка рисков в российских и международных стандартах безопасности и устойчивого развития // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023. № 1 (46). С. 57–71. EDN OFRJSZ.

Поступила в редакцию 3 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Эдуардовна Смирнова — кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru;

Михаил Юрьевич Слесарев — доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства; 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: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ammenberg J., Sundin E. Products in environmental management systems: Drivers, barriers and experiences. *Journal of Cleaner Production*. 2005; 13(4):405-415. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2003.12.005

2. Testa F., Rizzi F., Daddi T., Gusmerotti M., Frey M., Iraldo F. EMAS and ISO 14001: The differences in effectively improving environmental performance. *Journal of Cleaner Production*. 2014; 68:165-173. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.12.061

3. Budi I.Y., Karuniasa M., Nurcahyo R. Effectiveness of ISO 14001: 2015 implementation in small and medium enterprises (case study: a laundry machine industry SME in Bantul Yogyakarta). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 423(1):012010. DOI: 10.1088/1755-1315/423/1/012010

4. Wong C.W., Wong C.Y., Boon-itt S. Environmental management systems, practices and outcomes: Differences in resource allocation between small

and large firms. *International Journal of Production Economics*. 2020; 228:107734. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107734

5. Bravi L., Santos G., Pagano A., Murmura F. Environmental management system according to ISO 14001:2015 as a driver to sustainable development. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2020; 27(6):2599-2614. DOI: 10.1002/csr.1985

6. Montobbio F., Solito I. Does the Eco-Management and Audit Scheme Foster Innovation in European Firms? *Business Strategy and the Environment*. 2018; 27(1):82-99. DOI: 10.1002/bse.1986

7. Younis H., Sundarakani B. The impact of firm size, firm age and environmental management certification on the relationship between green supply chain practices and corporate performance. *Benchmarking: An International Journal*. 2019; 27(1):319-346. DOI: 10.1108/BIJ-11-2018-0363

8. Smirnova E.E. Risk analysis and management according to Russian and international safety standards. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2023; 13(2):336-347. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-336-347. EDN EARQBL. (rus.).
9. Zimon D., Madzik P., Dellana S., Sroufe R., Ikram M., Lysenko-Ryba K. Environmental effects of ISO 9001 and ISO 14001 management system implementation in SSCM. *The TQM Journal.* 2021. DOI: 10.1108/TQM-01-2021-0025
10. Heras-Saizarbitoria I., Boiral O., de Junguitu A.D. Environmental management certification and environmental performance: Greening or greenwashing? *Business Strategy and the Environment.* 2020; 29(6):2829-2841. DOI: 10.1002/bse.2546
11. Ronalter L.M., Bernardo M., Romani J.M. Quality and environmental management systems as business tools to enhance ESG performance: a cross-regional empirical study. *Environment, Development and Sustainability.* 2022; 25(9):9067-9109. DOI: 10.1007/s10668-022-02425-0
12. Arimura T.H., Hibiki A., Katayama H. Is a voluntary approach an effective environmental policy instrument? *Journal of Environmental Economics and Management.* 2008; 55(3):281-295. DOI: 10.1016/j.jeem.2007.09.002
13. Valenciano-Salazar J.A., Andre F.J., Martiñde Castro G. Sustainability and firms' mission in a developing country: The case of voluntary certifications and programs in Costa Rica. *Journal of Environmental Planning and Management.* 2022; 65(6):2029-2053. DOI: 10.1080/09640568.2021.1950658
14. García-Álvarez M., de Junguitu A.D. Shedding light on the motivations and performance of the eco-management and audit scheme (EMAS). *Environmental Impact Assessment Review.* 2023; 99:107045. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107045
15. Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J. Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 869:062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017
16. Hinojosa A.S., Gardner W.L., Walker H.J., Cogliser C., Gullifor D. A review of cognitive dissonance theory in management research. *Journal of Management.* 2017; 43(1):170-199. DOI: 10.1177/0149206316668236
17. Daddi T., Magistrelli M., Frey M., Iraldo F. Do environmental management systems improve environmental performance? Empirical evidence from Italian companies. *Environment, Development and Sustainability.* 2011; 13(5):845-862. DOI: 10.1007/s10668-011-9294-8
18. Wagner M. The influence of ISO 14001 and EMAS certification on environmental and economic performance of firms: An empirical analysis. *Environmental Management Accounting — Purpose and Progress.* 2003; 367-386. DOI: 10.1007/978-94-010-0197-7_16
19. Svensson E., Andersson K. *Inventory and evaluation of environmental performance indices for shipping. Report No R 11:132.* Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2011; 71.
20. Rajesh R. Exploring the sustainability performances of firms using environmental, social, and governance scores. *Journal of Cleaner Production.* 2020; 247:119600. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119600
21. Broadstock D.C., Chan K., Cheng L.T.W., Wang X. The role of ESG performance during times of financial crisis: Evidence from COVID-19 in China. *Finance Research Letters.* 2021; 38:101716. DOI: 10.1016/j.frl.2020.101716
22. Ammenberg J. Do standardised environmental management systems lead to reduced environmental impacts? *Ser.: Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations.* Linköping, Linköping University, 2003; 109.
23. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. System of assessment of ecological safety of construction processes in the megalopolis: problem and solution. *Ecology of Urban Areas.* 2013; 1:13-17. EDN PZTSL. (rus.).
24. Slesarev M. Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies. *E3S Web of Conferences.* 2021; 258:09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084
25. Heras-Saizarbitoria I., García M., Boiral O., de Junguitu A.D. The use of eco-efficiency indicators by environmental frontrunner companies. *Ecological Indicators.* 2020; 115:106451. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106451
26. Smirnova E. Problems of ecology and ensuring environmental safety in relation to toxic “Krasny Bor” dump site. *E3S Web of Conferences.* 2020; 175:14015. DOI: 10.1051/e3sconf/202017514015
27. Flagstad I., Hauge A.L., Johnsen S.Å.K. Certification dissonance: Contradictions between environmental values and certification scheme requirements in small-scale companies. *Journal of Cleaner Production.* 2022; 358:132037. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132037
28. Fagioli F.F., Paolotti L., Boggia A. Trends in environmental management systems research. A content analysis. *Environmental and Climate Technologies.* 2022; 26(1):46-63. DOI: 10.2478/rtuct-2022-0005
29. Todaro N.M., Daddi T., Testa F., Iraldo F. Organization and management theories in environmental management systems research : a systematic literature review. *Business Strategy & Development.* 2020; 3(1):39-54. DOI: 10.1002/bsd2.77
30. Erauskin-Tolosa A., Zubeltzu-Jaka E., Heras-Saizarbitoria I., Boiral O. ISO 14001, EMAS and environmental performance: A meta-analysis. *Business Strategy and the Environment.* 2020; 29(3):1145-1159. DOI: 10.1002/bse.2422

31. Smirnova E.E. Risk assessment in Russian standards. *Modern Problems of Civil Protection*. 2023; and international safety and sustainable development 1(46):57-71. EDN OFRJSZ. (rus.).

Received October 3, 2023.

Adopted in revised form on November 8, 2023.

Approved for publication on November 8, 2023.

B I O N O T E S: **Yelena E. Smirnova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; slesarev@mgsu.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Экспериментальное определение параметров методики исследования прочности смерзания грунта и материала фундамента

Андрей Владимирович Бояринцев¹, Евгений Константинович Козликин²,
Сергей Александрович Козельских³

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Петромоделинг лаб; г. Москва, Россия;

³ Проектное бюро «Резерв»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Прочность смерзания — прочностная характеристика мерзлых грунтов, описывающая их механическое взаимодействие с подземными конструкциями зданий и сооружений. Данная характеристика используется при определении несущей способности свай, расположенных в зоне распространения вечной мерзлоты, а также оценке выдерживающего воздействия касательных сил морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов. Прочность смерзания устанавливается лабораторными опытами посредством реализации сдвига мерзлого грунта относительно испытываемого материала. Существует несколько различных методов определения прочности смерзания, все они имеют недостатки: одни громоздки и сложны в проведении, в других невозможна реализация моделирования всех типов условий промерзания грунтов.

Материалы и методы. Для исследования прочности смерзания стеклопластика с образцом мерзлого грунта на кафедре геотехники СПбГАСУ предложен новый метод установления прочности смерзания грунта и подземной конструкции, позволяющий сократить трудоемкость испытаний, минимизировать дополнительное воздействие на испытываемые грунты в процессе их подготовки, а также учитывать особенности промерзания грунта вокруг фундамента. Однако, как любой новый метод, он обладает рядом неопределенностей. Экспериментально определены оптимальные параметры методики: соотношение диаметра образца материала к его высоте, конструктивное исполнение опоры, а также способа утепления при промораживании.

Результаты. Форма испытываемого образца имеет существенное влияние на конечное значение прочности смерзания, конструкция опоры и способ утепления образцов оказывают воздействие на получаемый результат в ходе испытания. Наиболее оптимальными решениями служат: применение опоры в виде кольца, препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта, и использование утепления путем погружения образцов в утеплитель, а не оборачивание им.

Выводы. Представлена законченная методика определения прочности смерзания грунта с материалом подземной конструкции, достоверность получаемых результатов по которой превосходит достоверность данных, полученных по методу ГОСТ, что проявилось в более низком значении коэффициента вариации внутри результатов контрольной выборки образцов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многолетнемерзлый грунт, прочность смерзания, методы испытаний грунтов, лабораторные испытания, механические свойства грунтов, новый метод испытаний, статистическая значимость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бояринцев А.В., Козликин Е.К., Козельских С.А. Экспериментальное определение параметров методики исследования прочности смерзания грунта и материала фундамента // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 415–425. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.415-425

Автор, ответственный за переписку: Андрей Владимирович Бояринцев, Andrey_boyarintsev@mail.ru.

Experimental determination of the parameters of the methodology for investigating the frost strength bond of soil and foundation material

Andrey V. Boyarintsev¹, Evgeniy K. Kozlikin², Sergei A. Kozelskikh³

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint-Petersburg, Russian Federation;

² Petromodeling Lab; Moscow, Russian Federation;

³ Design bureau “Rezerv”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Freezing strength is a strength characteristic of frozen soils that describes their mechanical interaction with underground structures of buildings and structures. This characteristic is used in determining the bearing capacity of piles located in the zone of permafrost, and in assessing the pull-out effect of the tangential forces of frost heaving of seasonally frozen soils. The strength of freezing is determined by laboratory experiments, through the implementation of a shift of frozen soil relative to the material being tested. There are several different methods for determining the freezing strength, but all of them have some disadvantages: some are cumbersome and difficult to carry out; in others it is impossible to simulate all types of soil freezing conditions.

Materials and methods. To study the freezing strength of glass-reinforced plastic with a frozen soil specimen, the Department of Geotechnics of SPbGASU proposed a new method for determining the freezing strength of soil and underground structures, which makes it possible to reduce the labour intensity of testing, minimize the additional impact on the tested soils during their preparation, and also take into account the peculiarities of soil freezing around the foundation. However, like any new method, it has a number of uncertainties. In the framework of this study, the optimal parameters of the method were experimentally established: the ratio of the diameter of the form to its height, the design of the support, as well as the method of insulation during freezing.

Results. The shape of the tested specimen has a significant influence on the final value of the freezing strength, the construction of the support and the method of insulation of the specimens influence the obtained result during the test. The best solutions are: the use of a ring-shaped support that prevents mould movement and does not prevent ground movement, and the use of insulation by immersing the specimens in the insulation rather than wrapping them in it.

Conclusions. A complete method for determining the frost strength bond of soil with underground structure material is presented, the reliability of the results obtained is superior to that of the data obtained by the GOST method, as shown by the lower value of the coefficient of variation within the results of the control sample of specimens.

KEYWORDS: permafrost, frost strength bond, test method, lab tests, mechanical properties, new method of testing

FOR CITATION: Boyarintsev A.V., Kozlikin E.K., Kozelskikh S.A. Experimental determination of the parameters of the methodology for investigating the frost strength bond of soil and foundation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):415-425. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.415-425 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Boyarintsev, Andrey_boyarintsev@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Прочность смерзания мерзлых грунтов с различными материалами является основной характеристикой механики мерзлых грунтов, при помощи которой описывается взаимодействие подземных конструкций с многолетнемерзлыми и сезонно-мерзлыми грунтами.

В отечественной нормативной литературе (СП 22.13330, СП 24.13330, СП 25.13330) величина прочности смерзания применяется при определении несущей способности основания (величина R_{af} в составе формулы) и оценке устойчивости фундамента на действие касательных сил морозного пучения (величина расчетной удельной касательной силы пучения τ_{fn}).

Для экономически эффективного и технически безопасного строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов необходимо знать точное значение прочности смерзания грунтов с материалами подземных конструкций. Являясь сложной характеристикой, зависящей от множества факторов, среди которых: тип и влажность грунта [1], его температура [2, 3], материал конструкций фундамента [4], шероховатость его поверхности [5], а также время [6, 7]; наиболее точным методом установления прочности смерзания служат лабораторные методы, учитывающие полный комплекс факторов, которые будут влиять на грунты при их дальнейшей эксплуатации.

Первые исследования прочности смерзания грунта с материалом фундамента выполнены Н.А. Цытовичем [8]. Разработанный им прибор (рис. 1, а) представляет собой цилиндрическую емкость из кольца 1, вставленную в поддон 2, в дни-

ще которого имеется круглое отверстие 3, предназначенное для продавливания цилиндрической стойки из материала фундамента 4, емкость заполняется грунтом, замораживается до температуры испытания, затем проводится испытание путем нагружения стойки ступенчатой или постоянной нагрузкой до разрушения связей на границе «мерзлый грунт – материал» через наголовник 5 (рис. 1, а). К недостаткам данной методики можно отнести то, что для испытаний требуется специально изготавливать модели фундамента, свойства которых могут отличаться от свойств реальных материалов, используемых в проекте строительства. Кроме того, для реализации испытаний необходима дополнительная оснастка в виде емкости, в которой размещаются испытуемые грунт и модель фундамента. Также следует иметь в виду то, что в процессе укладки грунта в пространство между емкостью и моделью фундамента могут меняться его свойства в виду нарушения структуры.

Похожим принципом действия обладает прибор В.Ф. Ермакова (рис. 1, б) [9], который состоит из стального корпуса 1. Фундамент имитируется пластиной из строительного материала 2. В днище имеется прорезь, в которую устанавливается пластина размером 150 × 120 × 40 мм. Для исключения трения пластины о боковые стенки корпуса в них также устраивают прорезы, закрывающиеся съемными накладками. Прибор заполняется грунтом и устанавливается в холодильную камеру для замораживания грунта. После достижения необходимой температуры грунта прибор помещают под пресс и прикладывают нагрузку к верхнему торцу пластины. Данная методика позволяет покрывать поверхность пластины образцом реального мате-

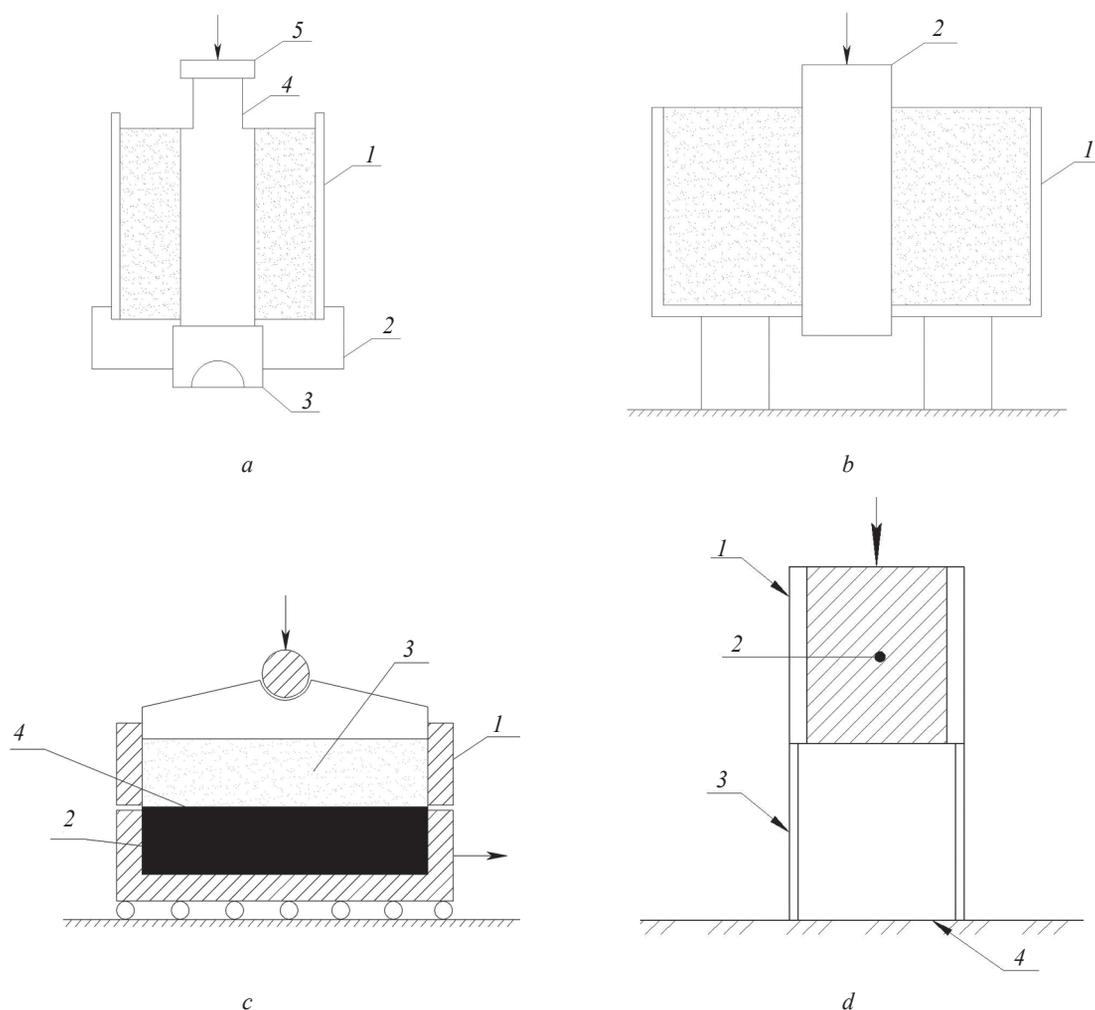


Рис. 1. Способы определения прочности смерзания: *a* — метод Н.А. Цытовича; *b* — метод В.Ф. Ермакова; *c* — метод по ГОСТ 12248.8; *d* — метод по патенту РФ № 2749226

Fig. 1. The methods of determination of frost strength bond: *a* — method of N. Tsitovich; *b* — method of F. Ermakov; *c* — method of GOST 12248.8; *d* — method of patent RU No. 2749226

риала, принимаемого в проекте строительства. Тем не менее этой методике присущи такие недостатки, как: необходимость в дополнительной оснастке, возможность расструктурирования грунта в процессе подготовки эксперимента.

Отечественная нормативная литература рекомендует определять прочность смерзания по ГОСТ 12248.8 (рис. 1, *c*). Методика предполагает проведение опытов на стандартных приборах одноплоскостного среза *I*, где в одной половине размещается образец исследуемого материала фундамента *2*, в другой — образец исследуемого мерзлого грунта *3*, зазор между частями прибора располагается на границе «грунт – материал конструкции» *4*. Применение этой методики позволяет исключить все недостатки приведенных выше методик. Однако следует отметить, что при реализации экспериментов по указанной методике невозможно учесть влияние испытываемого материала на распределение температурных полей в промораживаемом образце грунта, что сказывается на формировании криотекстуры мерзлого грунта на контакте с материалом и, как

следствие, на значении прочности смерзания грунта и материала [10–14].

На кафедре геотехники СПбГАСУ была разработана новая методика определения прочности смерзания грунта и строительных материалов и получен патент РФ № 2749226 [15] (рис. 1, *d*). Форма (корпус) *1*, выполненная из того же материала, что и исследуемый материал фундамента проектируемого здания, имеющая круглое поперечное сечение, заполнена исследуемым мерзлым грунтом *2*, предварительно замороженная вместе с грунтом *2* до требуемой температуры и установленная на пустотелую опору *3*, препятствующую перемещению формы *1* и не препятствующую перемещению грунта *2*, которая стоит на горизонтальной поверхности *4*.

Данный метод испытания позволяет сократить количество используемого в ходе испытания оборудования, отбирать образцы грунта непосредственно на площадке строительства или из выбуренных кернов, что минимизирует риски их расструктурирования. Ввиду того, что образец испытываемого

материала вырезается из проектируемой свайной конструкции, в испытаниях учитываются все особенности свойств материала, из которого будут изготовлены сваи проектируемого здания или сооружения. Процесс промерзания грунта перед испытанием целиком моделирует промерзание грунта в реальных условиях вокруг сваи, учитывая тепло-техническое влияние фундамента на грунт.

Таким образом, предложенная методика является потенциально перспективной для определения мгновенной и длительной прочностей смерзания образцов грунта с материалами подземных конструкций. Кроме того, по ней возможно проведение испытаний с любой заданной скоростью приложения нагрузки, например со скоростью морозного пучения грунта [16–19], что позволит установить удельные касательные силы морозного пучения грунта, воздействующие на конкретный фундамент. Однако, как любая новая методика, она обладает рядом неопределенностей: влияние размеров образцов, способов промораживания образцов, варианты исполнения сопутствующей оснастки могут оказывать влияние на получаемые результаты. Как пример влияния размеров образцов на получаемые результаты испытаний следует отметить результаты экспериментальных исследований, посвященных изучению воздействия кривизны поверхности образца на получаемые значения прочности смерзания [20]. Исследования выполнялись по методике Н.А. Цытовича для

моделей различного диаметра. Результаты показали, что с увеличением диаметра силы смерзания уменьшаются до двух раз, при этом при величине диаметра более 11–15 см значения практически не меняются.

Цель настоящего исследования — экспериментально определить наиболее оптимальные параметры данной методики: размеры формы (корпуса), исполнение опоры, а также влияние утепления образцов при их промораживании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Грунт

Исследования выполнялись на двух типах грунтов: кембрийской текучей глине нарушенного сложения и супеси песчанистой пластичной ненарушенного сложения (рис. 2, а), отобранной в котловане г. Санкт-Петербурга на глубине двух метров (рис. 2, б). Основные характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Размеры формы

Для исследования влияния размеров формы были изготовлены 54 образца из ПВХ труб с разным соотношением диаметра к высоте (диаметр/высота, мм): 50/50, 50/75, 50/100, 75/50, 75/75, 75/100, 100/50, 100/75, 100/100.

Образцы заполнялись грунтом № 1. Перед испытанием образцы утеплялись с трех сторон спосо-

Табл. 1. Физические характеристики испытанных грунтов

Table 1. The physical performances of the tested soils

Номер Number	Влажность / Water content			Число пластично- сти I_p , % Plasticity index I_p , %	Показатель текучести I_L , д. ед. Index of liquid I_L , sub- multiples	Плотность ρ , г/см ³ Soil density ρ , g/cm ³	Плотность твер- дых частиц ρ_s , г/см ³ Density of soil particles ρ_s , g/cm ³
	Естественная W , % Water content of soil W , %	На грани- це текуче- сти W_L , % Liquid limit limit W_L , %	На границе пластичности W_p , % Plastic limit W_p , %				
1	50	48	22	26	1,08	1,81	2,61
2	25,7	28	25	3	0,23	2,00	2,69



а



б



Рис. 2. Создание грунта нарушенной структуры (а); отбор грунта ненарушенной структуры (б)

Fig. 2. The process of soil making with disturbed structure (a); sampling of undisturbed soil (b)

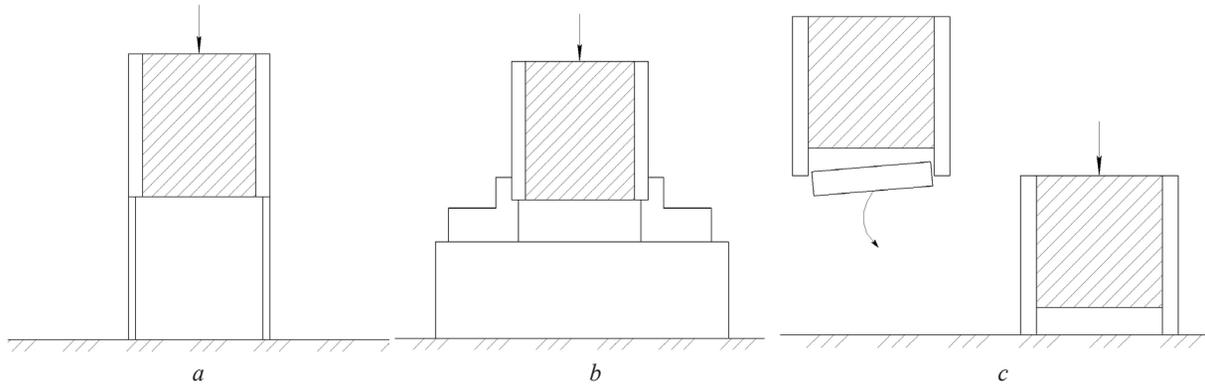


Рис. 3. Схемы конструкций опор, принятых к сравнению: *a* — тип 1: пустотелое кольцо; *b* — тип 2: трехкулачковый зажимной патрон; *c* — тип 3: выполнение полости заглушкой

Fig. 3. The different kind of support: *a* — the hollow ring; *b* — the three jaw chuck; *c* — the cap

бом № 1, промораживались до температуры -6°C , с контролем температуры образцов в процессе их промерзания, и испытывались по указанной ранее методике. В качестве опоры использовался трехкулачковый зажимной патрон.

Тип опоры

Для испытаний были разработаны следующие типы опоры (рис. 3):

- пустотелое кольцо того же диаметра, что и форма;
- трехкулачковый зажимной патрон токарного станка;
- заглушка, формирующая полость определенных размеров внутри формы.

Образцы заполнялись грунтом № 2, утеплялись методом № 3, промораживались до температуры -6°C , с контролем температуры образцов в процессе их промерзания, и испытывались по указанной ранее методике.

В каждой партии было испытано по 6 образцов с соотношением диаметра к высоте (D/H), равным 1,3. Для определения качества утепления оцени-

вался коэффициент вариации полученных значений прочности смерзания внутри каждой партии.

Утепление образцов

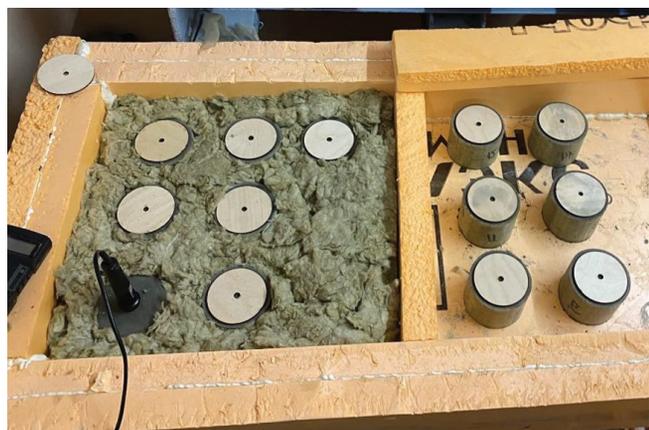
Для исследования влияния утепления и способа его исполнения на получаемый результат испытывались образцы (рис. 4):

- без утепления (рис. 4, *b*);
- способ 1 — обмотка по контуру минеральной ватой и установка на слой экструдированного пенополистирола (рис. 4, *a*);
- способ 2 — погруженные в лоток из экструдированного пенополистирола, заполненного минеральной ватой (рис. 4, *b*).

В каждой партии испытано по шесть образцов с соотношением диаметра к высоте (D/H), равным 1,3. С целью определения качества утепления оценивался коэффициент вариации полученных значений прочности смерзания внутри каждой партии. Для оценки влияния утепления при промерзании сравнивались значения прочности смерзания образцов, замороженных с утеплителем и без него. Испытания проводились по представленной выше методике.



a



b

Рис. 4. Варианты утепления образцов: *a* — способ 1; *b* — способ 2 и без утепления

Fig. 4. The kind of thermal isolation of the specimens: *a* — type 1; *b* — type 2 and without thermal isolation



Рис. 5. Испытание образцов

Fig. 5. The testing process

Испытание образцов

Продавливание образцов производилось на испытательной машине INSTRON W-5196 с максимальным усилием 600 кН и оборудованной криокамерой. Испытания велись также при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. После доставки из морозильной камеры в лабораторию образцы помещались в холодильный шкаф и выстаивались при температуре испытаний, после чего испытывались (рис. 5). В ходе испытаний оборудование позволяет вести автоматическую запись прикладываемых усилий и перемещений образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Размеры формы

В процессе испытания фиксировалась плотность заполнения колец грунтом, а также прочность

смерзания грунта и ПВХ колец. На рис. 6 приведены результаты испытаний в виде зависимостей плотности заполнения колец грунтом и прочности их смерзания от соотношения диаметра кольца образца к его высоте.

Анализ полученных результатов показывает, что на стадии заполнения форм наиболее оптимальными являются формы с соотношением их диаметра к высоте (D/H) в диапазоне от 0,75 до 1,3, что обуславливается низким значением коэффициента вариации, равным 0,56 %, по сравнению со значением коэффициента вариации, достигающим 3,13 %, для образцов с соотношением, равным 2 соответственно. Данный результат может быть объяснен тем, что грунты переминаются в процессе погружения колец и разуплотняются при их выемке. Таким образом,

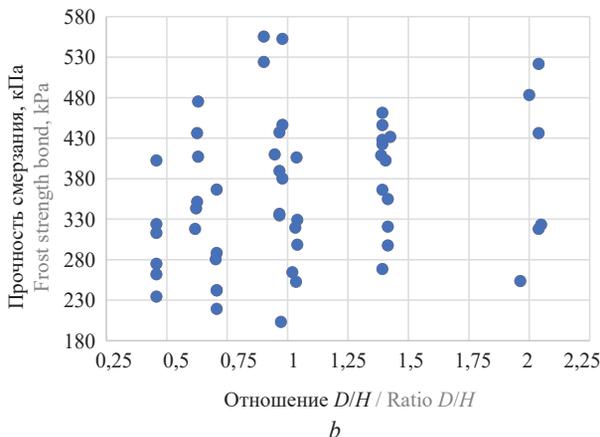
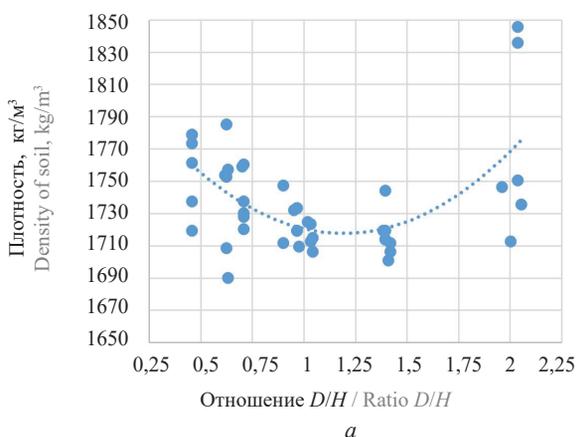


Рис. 6. Зависимости плотности заполнения форм грунтом (a) и прочности смерзания (b) от отношения габаритных размеров формы (D/H)

Fig. 6. Dependences of density of mould filling with soil (a) and frost strength bond (b) on the ratio of mould dimensions (D/H)

применение образцов с соотношением диаметра к высоте 0,75–1,3 способствует сохранению естественной плотности грунта. Принимая во внимание результаты исследований [20], рекомендуется использовать кольца размером не менее 100 мм.

Значения, полученные при определении прочности смерзания, обладают большой погрешностью, коэффициент вариации составляет 14,48–27,32 %. При этом наименьшее значение соответствует образцам с соотношением $D/H = 1,3$.

Сопоставление коэффициентов вариации распределения плотностей образцов и полученных значений прочности смерзания свидетельствует о том, что погрешность в результаты была внесена на последующих этапах испытания: промораживание, продавливание образцов сквозь форму.

Тип опоры

В ходе испытания устанавливались значения прочности смерзания грунта № 2 и формы, выполненной из полимерного композита. Далее сопоставлялись коэффициенты вариации внутри каждой испытанной группы образцов. Результаты сведены в табл. 2.

Результаты испытания показывают, что конструкция исполнения опоры оказывает влияние на получаемый в ходе испытания результат. Среди рассмотренных конструкций опоры наиболее оптимальной является опора, выполненная в виде кольца,

препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта в процессе испытания. Следует отметить, что кольцо опоры перед испытанием торцевалось и выставлялось в горизонтальном положении при помощи уровня.

Утепление образцов

В ходе испытания определялись значения прочности смерзания грунта № 2 и формы, выполненной из полимерного композита. Далее сопоставлялись коэффициенты вариации внутри каждой испытанной группы образцов. Результаты приведены в табл. 3.

Результаты испытания показывают, что способ и качество утепления образцов могут существенно сказаться на получаемых результатах испытания. Так, при утеплении по типу 1 было трудно поддерживать равномерность покрытия образца утеплителем: толщину слоя утепления по периметру образца и его высоте. Кроме того, образовывался зазор между нижней частью, выполненной из экструдированного пенополистирола, и боковой, выполненной из минеральной ваты. Все это способствовало внесению погрешности в испытание.

Наблюдалось и различие между значениями прочности смерзания, полученными для образцов, замороженных с утеплением и без него. Прочность смерзания утепленных образцов выше прочности смерзания образцов, замороженных без утепления на 33,4 %. Данный эффект можно объяснить различием

Табл. 2. Результаты испытания различных типов опор

Table 2. The results of testing of the specimens with different kinds of the support

Тип опоры Type of support	Тип 1. На кольцо Type 1. The hollow ring	Тип 2. На патроне Type 2. The three jaw chuck	Тип 3. С заглушкой Type 3. The cap
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	516,77	736,34	466,09
	530,15	850,14	450,42
	620,65	404,22	298,36
	613,07	561,16	548,62
	–	–	393,55
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	9,52	30,72	21,51

Табл. 3. Результаты испытания образцов с различными способами утепления

Table 3. The results of testing of the specimens with different types of thermal isolation

Тип утепления Isolation type	Без утепления Without isolation	Способ 1 Type 1	Способ 2 Type 2
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	490,02	380,04	758,83
	419,04	446,33	697,37
	459,93	555,22	572,44
	591,71	524,00	709,71
	529,7	552,39	709,87
	565,2	–	645,1
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	12,81	15,52	9,51



Рис. 7. Образцы, замороженные без утепления (слева) и с утеплением (справа)

Fig. 7. The specimens which were frozen without thermal isolation (on the left side) and with thermal isolation (on the right side)

ным распространением фронта промерзания внутри образца и, как следствие, в процессах миграции влаги при различных условиях его промерзания [21–23].

На рис. 7 представлены образцы, утепленные и не утепленные при промораживании. На фото можно заметить наличие сухого грунта вдоль кольца, что можно объяснить «поршневым эффектом»: отжатием влаги из грунта при продвижении фронта промерзания [8]. Данный эффект может быть противоположным: миграцией влаги к фронту промерзания при испытаниях грунтов с большим содержанием глинистых частиц и содержанием пор меньшего размера. Это подтверждает, что применение предложенной методики позволяет учесть процессы изменения влажности грунта, его текстуры на контакте с испытуемым материалом.

Таким образом, использование опоры в виде трехкулачкового патрона и первого типа утепления при проведении первого опыта объясняет внесение

значительной погрешности в результат испытания, характеризующийся значением коэффициента вариации до 27,32 %.

Сопоставление двух методик

С целью сопоставления результатов разработанной методики [15] и метода по ГОСТ 12248.8 были испытаны две группы по шесть образцов. Для исключения влияния различной шероховатости и гидрофобности материалов поверхность контакта «грунт – материал» была покрыта песком фракции 0,5–1 мм, согласно работе [24]. Результаты сведены в табл. 4.

Результаты эксперимента показывают, что методика, представленная в работе [15], имеет преимущество по сходимости результатов партии, а также по удобству проведения эксперимента. Кроме того, применение ряда мероприятий, таких как: усовершенствование типа опоры, применение размеров образцов определенной формы и способа утепления, способствовали снижению погрешности в испытаниях, что проявилось снижением коэффициента вариации с 30,72 до 6,59 %.

Данный результат свидетельствует об отсутствии влияния кривизны внутренней поверхности образцов в виде колец диаметром 100 мм.

Тем не менее говорить о полном превосходстве представляемой методики над другими преждевременно, поскольку в работе представлены результаты частных испытаний, а не систематических. Для точного определения эффективности методики необходимо ее опытное внедрение в работу инженерно-геологической лаборатории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- форма испытуемого образца имеет существенное влияние на конечное значение прочно-

Табл. 4. Результаты испытания образцов двумя различными методиками

Table 4. The results of testing by two different methods

Метод испытания Test method	ГОСТ 12248.8 GOST 12248.8	Патент РФ № 2749226 Patent RU No. 2749226
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	1713,07	1912,29
	1909,7	1853,98
	1917,56	1895,80
	1386,66	1940,82
	1909,7	1893,77
Среднее значение*, кПа Average value*, kPa	1862,5	1899,3
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	12,99	6,59

Примечание: * — средние значения представлены после исключения из выборки значений, выявленных как грубые погрешности.

Note: * — average values are presented after exclusion of the gross errors from the tasted specimens.

сти смерзания, поскольку соотношение диаметров образца к его высоте влияет на процесс заполнения формы грунтом, способствуя образованию зон уплотнения или разуплотнения. Оптимальным соотношением габаритных размеров образцов испытуемых материалов являются $D/H = 0,75–1,3$;

- конструкция опоры и способ утепления образцов оказывают влияние на получаемый результат в ходе испытания. Наиболее оптимальными решениями являются: применение опоры в виде кольца, препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта, и использование утепления путем погружения образцов в утеплитель, а не оборачивание им;

- наличие или отсутствие утеплителя оказывает значительное влияние на получаемый результат, что можно объяснить различием распределения температуры и, как следствие, процессами миграции влаги внутри образца при его промерзании. Поэтому для чистоты эксперимента образцы должны промораживаться по схеме, приближенной к условиям промерзания в реальных условиях, что позволяет реализовать предложенная методика;

- разработанный способ определения прочности смерзания грунта с материалами фундамента не уступает существующей методике, представленной в актуальной отечественной нормативной документации, по точности получаемых данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Wen Z., Yu Q., Ma W., Dong S., Wang D., Niu F. et al.* Experimental investigation on the effect of fiber-glass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 131. Pp. 108–115. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.07.009

2. *Волохов С.С., Соловьева Н.В.* Прочность смерзания мерзлых грунтов с материалами трубопроводов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. № 5. С. 25–28. EDN SKAOLB.

3. *Волохов С.С.* Влияние шероховатости поверхности материалов фундаментов на прочность смерзания с грунтом в различных условиях // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 1993. № 3. С. 76–81.

4. *Boyarintsev A.V., Lanko S.V.* Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fibre reinforced plastic in frozen soil // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019. Pp. 49–53. DOI: 10.1201/9780429058882-10

5. *Соколов В.М.* Исследование силового воздействия промерзающего грунта на вертикальные элементы трубопроводов : дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1976. 163 с.

6. *Рыжков И.Б., Минкин М.А., Исаев О.Н.* Об определении длительной прочности мерзлых грунтов и несущей способности свай методом статического зондирования // *Жилищное строительство*. 2020. № 9. С. 54–64. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-54-64

7. *Гольдштейн М.Н.* Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании. М. : Трансжелдориздат, 1948. 212 с.

8. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1973. 446 с.

9. *Иоспа А.В., Аксёнов В.И., Шмелёв И.В.* Некоторые результаты испытаний противопучинных и антикоррозионных покрытий для защиты металлических фундаментов на многолетнемерзлых грун-

тах // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015. № 5. С. 27–31. EDN VICRKL.

10. *Johnson J., Buska J.S.* Measurement of frost heave forces on H-piles and pipe piles. State of Alaska department of transportation and public facilities, 1988.

11. *Hou X., Chen J., Yang B., Wang J., Dong T., Rui P. et al.* Monitoring and simulation of the thermal behavior of cast-in-place pile group foundations in permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. P. 103486. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103486

12. *Hou X., Chen J., Jin H., Rui P., Zhao J., Mei Q.* Thermal characteristics of cast-in-place pile foundations in warm permafrost at Beiluhe on interior Qinghai-Tibet Plateau: Field observations and numerical simulations // *Soils and Foundations*. 2020. Vol. 60. Issue 1. Pp. 90–102. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.01.008

13. *Mu Y., Wang G., Yu Q., Li G., Ma W., Zhao S.* Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 121. Pp. 226–236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.006

14. *Бояринцев А.В., Ланько С.В., Зыбцева А.В.* Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 5. С. 14–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23. EDN DTZGYI.

15. Патент RU № 2749226. МПК: E02D 1/02. Способ определения прочности смерзания / *Бояринцев А.В.*; заявл. № 2020136455 от 03.11.2020, опубл. 07.06.2021.

16. *Бояринцев А.В., Шорина А.Ю., Родионова Е.С., Матюшина В.А.* Опытное определение скорости морозного пучения для различных типов грунтов по степени пучинистости // *Вестник гражданских*

инженеров. 2022. № 2 (91). С. 66–73. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-66-73. EDN KDPSSDC.

17. Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Experimental research on frost heave characteristics of gravel soil and multifactor regression prediction // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2018/5682619

18. Ishikawa T., Kijiya I., Tokoro T., Akagawa S. Estimation of frost heave ratio of soils in contemplation of matric suction under low overburden pressure // *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*. 2015. Vol. 70. Issue 3. Pp. 65–70. DOI: 10.2208/jscejpe.70.I_65

19. Arroyo M., Pineda M., Sau N., Devincenzi M., Perez N. Sample quality examination on silty soils // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Vol. 6. Pp. 2873–2878. DOI: 10.1680/jge.60678.vol6.445

20. Аксёнов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М. : Все о мире стр-ва, 2008. 351 с.

21. Кудрявцев С.А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезонно-промерзающих грунтов // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2003. № 7. С. 233–240.

22. Лебеденко Ю.П. Миграция влаги и сегрегационное выделение в льдодисперстных породах : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1978. 136 с.

23. Частотинов Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М. : Наука, 1973. 144 с.

24. Патент RU № 2720595. МПК: E02D 5/24. 2020. Способ повышения несущей способности сваи по грунту / Бояринцев А.В., Ланько С.В.; заявл. № 2019145667 от 31.12.2019, опубл. 12.05.2020.

Поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 января 2024 г.

Одобрена для публикации 12 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Владимирович Бояринцев** — старший преподаватель кафедры геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1001889; Andrey_boyarintsev@mail.ru;

Евгений Константинович Козликин — инженер 3-й категории; **Петромоделинг лаб**; 119270, г. Москва, Лужнецкая наб., д. 10а, стр. 6 Э 1, пом. II; eugenekozlikin@gmail.com;

Сергей Александрович Козельских — руководитель подразделения; **Проектное бюро «Резерв»**; 125284, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 31 А, стр. 1; sergey.kozelskikh@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Wen Z., Yu Q., Ma W., Dong S., Wang D., Niu F. et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 131:108–115. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.07.009

2. Volokhov S.S., Solov'eva N.V. Strength of soils frozen to pipeline materials. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2010; 5:25–28. EDN SKAOLB. (rus.).

3. Volokhov S.S. The influence of the foundation material roughness to frost strength bond in different conditions. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 1993; 3:76–81. (rus.).

4. Boyarintsev A.V., Lanko S.V. Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fibre reinforced plastic in frozen soil. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019; 49–53. DOI: 10.1201/9780429058882-10

5. Sokolov V.M. *The investigation of load impact of the freezing soil to the vertical structures of the pipe lines* : PhD thesis. Leningrad, 1976; 163. (rus.).

6. Ryzhkov I.B., Minkin M.A., Isaev O.N. Determination of long-term strength of frozen soils and bearing capacity of piles by means of cone penetration test. *Housing Construction*. 2020; 9:54–64. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-54-64 (rus.).

7. Goldstein M.N. *The deformations of the embankment and its soil base within soil freezing and melting*. Moscow, Transzheldorizdat, 1948; 212. (rus.).

8. Tsytoich N.A. *Mechanic of frozen soils*. Moscow, Higher School Publ., 1973; 446. (rus.).

9. Iospa A.V., Aksenov V.I., Shmelev I.V. Certain results of antiheave and anticorrosion tests of protective coatings for metal foundations on permafrost. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 5:27–31. EDN VICRKL. (rus.).

10. Johnson J., Buska J.S. *Measurement of frost heave forces on H-piles and pipe piles*. State of Alaska department of transportation and public facilities, 1988.

11. Hou X., Chen J., Yang B., Wang J., Dong T., Rui P. et al. Monitoring and simulation of the thermal behavior of cast-in-place pile group foundations in perma-

frost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022; 196:103486. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103486

12. Hou X., Chen J., Jin H., Rui P., Zhao J., Mei Q. Thermal characteristics of cast-in-place pile foundations in warm permafrost at Beiluhe on interior Qinghai-Tibet Plateau: Field observations and numerical simulations. *Soils and Foundations*. 2020; 60(1):90-102. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.01.008

13. Mu Y., Wang G., Yu Q., Li G., Ma W., Zhao S. Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 121:226-236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.006

14. Boyarintsev A.V., Lanko S.V., Zybteva A.V. The thermal engineering influence of the foundation on the depth of freezing and thawing of soils. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 5:14-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23. EDN DTZGYI. (rus.).

15. Patent RU No. 2749226. IPC: E02D 1/02. *Method for determining freezing strength* / Boyarintsev A.V.; application No. 2020136455 03.11.2020, publ. 06/07/2021. (rus.).

16. Boyarintsev A.V., Shorina A.Yu., Rodionova E.S., Matyushina V.A. Experimental assessing of frost heaving rate for various types of soils according to the heaving degree. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):66-73. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-66-73. EDN KDPSDC. (rus.).

17. Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Experimental research on frost heave characteristics of gravel soil and multifactor regression prediction. *Advances in*

Materials Science and Engineering. 2018; 2018:1-13. DOI: 10.1155/2018/5682619

18. Ishikawa T., Kijiya I., Tokoro T., Akagawa S. Estimation of frost heave ratio of soils in contemplation of matric suction under low overburden pressure. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*. 2015; 70(3):65-70. DOI: 10.2208/jscejpe.70.I_65

19. Arroyo M., Pineda M., Sau N., Devincenzi M., Perez N. Sample quality examination on silty soils. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 6:2873-2878. DOI: 10.1680/ec-smge.60678.vol6.445

20. Aksyonov V.I. *Saline frozen soils of the Arctic coast as the foundation of structures*. Moscow, All about the world of construction, 2008; 351. (rus.).

21. Kudryavcev S.A. Influence of migratory moisture on the process of frost heaving of seasonally frozen soils *Urban Reconstruction and Geotechnical Engineering*. 2003; 7:233-240. (rus.).

22. Lebedenko Yu.P. *Moisture migration and segregation in ice-dispersed rocks : PhD thesis*. Moscow, 1978; 136. (rus.).

23. Chastotinov L.V. *Moisture migration in freezing non-saturated soils*. Moscow, Nauka Publ., 1973; 144. (rus.).

24. Patent RU No. 2720595. IPC: E02D 5/24. 2020. *A method for increasing the load-bearing capacity of a pile on the ground* / Boyarintsev A.V., Lanko S.V.; application No. 2019145667 31, 2019, publ. 05/12/2020. (rus.).

Received January 11, 2024.

Adopted in revised form on January 11, 2024.

Approved for publication on September 12, 2023.

B I O N O T E S : **Andrey V. Boyarintsev** — senior lecturer at the Department of Geotechnics; **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 2nd, 4 Krasnoarmeiskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1001889; Andrey_boyarintsev@mail.ru;

Evgeniy K. Kozlikin — engineer 3rd category; **Petromodeling lab**; build. 6 E, 10a Luzhnetskaya embankment, Moscow, 1119270, Russian Federation; eugenekozlikin@gmail.com;

Sergei A. Kozelskikh — head of the region office; **Design bureau “Rezerv”**; build. 1, 31A Leningradskiy ave., Moscow, 125284, Russian Federation; sergey.kozelskikh@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы

Самех Абдельфаттах Араби Ахмед^{1,2}, Елена Сергеевна Гогина^{3,4},
Николай Алексеевич Макиша²

¹ Асуанский университет, г. Асуан, Египет;

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

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); г. Москва, Россия;

⁴ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Фенолы являются одним из основных органических компонентов, присутствующих в стоках многих промышленных предприятий. Удаление фенола из сточных вод, содержащих фенол, — приоритетная задача из-за его высокой токсичности для людей и животных даже при низкой концентрации. Адсорбция на основе активированного угля (АУ) — один из передовых процессов очистки, широко используется для очистки водных загрязнителей. Цель исследования — изучение адсорбции фенола на активированном угле на основе ветвей финиковой пальмы (ВФП-АУ) в качестве низкокзатратного адсорбента.

Материалы и методы. В качестве сырья для получения АУ методом химической активации H_3PO_4 использовались ВФП. Эксперименты по адсорбции проводились в партиях. Также исследованы кинетика и изотермы адсорбции.

Результаты. ВФП-АУ получен химической активацией ветвей финиковой пальмы с использованием H_3PO_4 (600 °С, 60 мин), образец был обозначен ВФП-АУ- H_3PO_4 . Результаты показали выход АУ в размере 52,7 %. Максимальная эффективность адсорбции фенола была достигнута при pH = 7. Адсорбция фенола хорошо описывалась кинетикой псевдодвухго порядка с K_2 , г/(мг·мин). Модель изотермы адсорбции фенола следовала модели Ленгмюра, где R^2 было 0,9215 и $K_L = 0,0161$ л/мг при 180 мин времени равновесия. Максимальная емкость адсорбции фенола составляла 77,52 мг/г (мг фенола, поглощенного/г ВФП-АУ- H_3PO_4), что является высоким значением по сравнению со многими другими результатами, представленными в литературе.

Выводы. Результаты свидетельствуют о том, что АУ, полученный из ветвей финиковой пальмы, может быть перспективным материалом для очистки сточных вод, а также эффективным средством для решения проблем экологического загрязнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фенол, адсорбция, активированный уголь, ветви финиковой пальмы, кинетика, изотерма адсорбции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ахмед С.А.А., Гогина Е.С., Макиша Н.А. Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 426–435. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.426-435

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Макиша, makishana@mgsu.ru.

Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches

Ahmed Sameh^{1,2}, Elena S. Gogina^{3,4}, Nikolay A. Makisha²

¹ Aswan University; Aswan, Egypt;

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

³ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI); Moscow, Russian Federation;

⁴ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Phenols are one of the main organic components present in the effluents of many industrial enterprises. However, the discharge of wastewater containing phenol is a priority due to its high toxicity to humans and animals, even at

low concentrations. Activated carbon (AC) adsorption, which is one of the advanced purification processes, is widely used to purify water pollutants and the production of activated carbon from several carbon by-products of agriculture was also reported. In this regard, the purpose of this research was to study the adsorption of phenol on activated carbon based on date palm branches (DPB-AC) as a low-cost adsorbent.

Materials and methods. DPB was used as a raw material for the production of AC by chemical activation of H_3PO_4 . Adsorption experiments were carried out in batches. The kinetics and isotherms of adsorption were also investigated.

Results. DPB-AC was obtained by chemical activation of date palm branches using H_3PO_4 (600 °C, 60 min), and the specimen was designated as (DPB-AC- H_3PO_4). The results showed an AC yield of 52.7 %. The maximum efficiency of phenol adsorption was achieved at pH 7. In addition, phenol adsorption was well described by the kinetics of the pseudo second order with $K_2 = 0.0503$ g/(mg·min). The phenol adsorption isotherm model followed the Langmuir model, where R^2 was 0.9215 and $K_L = 0.0161$ l/mg at 180-equilibrium time. The maximum adsorption capacity of phenol was 77.52 mg/g (mg of phenol absorbed/g of DPB-AC- H_3PO_4), which is a high value compared to many other results presented in the literature.

Conclusions. In general, the results indicate that AC obtained from date palm branches can be a promising material for wastewater treatment, as well as an effective means to solve environmental pollution problems.

KEYWORDS: Phenol, Adsorption, Activated carbon, Date palm branches, Kinetics, Adsorption isotherm

FOR CITATION: Ahmed Sameh, Gogina E.S., Makisha N.A. Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):426-435. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.426-435 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Makisha, makishana@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время удалению фенола уделяется все большее внимание. Источниками фенола являются выбросы химической промышленности от газификации угля, производства полимерных смол, нефтепереработки, коксохимических заводов, бумажных комбинатов, производства гербицидов и фунгицидов. Актуально удаление фенольных соединений, которые служат одними из главных загрязнителей окружающей среды. Фенольные соединения формируются не только в результате деятельности человека, но и естественным образом [1].

Фенолы более устойчивы, чем спирты, реагируют с основаниями, такими как гидроксид натрия, образуя ионы феноксида. Они более слабые кислоты, чем карбоксильные кислоты, и не реагируют с гидрокарбонатом натрия. Чистый фенол — ароматический углеводород, производный от бензола с химической формулой C_6H_5OH . Представляет собой белое кристаллическое твердое вещество с запахом дезинфицирующего средства, хорошо растворяется в воде при комнатной температуре [2].

Однако фенол рассматривается как приоритетный загрязнитель с высокой токсичностью даже при низких концентрациях. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) установило предельное значение фенола в воде для обеспечения здоровья человека на уровне 0,5 мг/л для предотвращения возможных вредных последствий при употреблении воды или загрязненных растений и продуктов животноводства [3]. Согласно законодательству Российской Федерации, максимально допустимая концентрация фенола в воде водных объектов составляет 0,001 мг/л¹.

¹ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552.

Деструктивные воздействия фенола на организм человека хорошо задокументированы. При попадании фенола в организм через систему пищеварения происходит повреждение слизистой оболочки полости рта, пищевода и желудочно-кишечного тракта, требующее немедленной медицинской помощи. При длительном или повторном воздействии вещество впитывается через кожу и слизистые оболочки, потенциально влияя на печень, почки, глаза и центральную нервную систему [4, 5]. Ввиду высокой токсичности фенольных соединений обработка органических сточных вод (СВ) оказывает важное воздействие на жизнь человека. Фенол может быть эффективно удален с использованием традиционных методов, таких как экстракция, дистилляция, химическое окисление, электрохимическое окисление и адсорбция. Активированный уголь (АУ) — наиболее широко используется в промышленности как адсорбент. Он эффективен для удаления следов органических соединений. Активированный уголь — аморфный углеродный материал, который проявляет отличную эффективность в процессе адсорбции, прежде всего благодаря большой поверхности и высокой пористости [6]. Поиск новых предшественников в производстве активированного угля также изучается как экономическая альтернатива. Агропромышленные отходы выделяются как перспективные предшественники благодаря своей доступности, значительной механической прочности и низкому содержанию золы с высоким содержанием углерода. Проведены исследования процесса адсорбции с использованием АУ, полученного из отходов, таких как скорлупа пекана, кора дуба, апельсиновая кожура, скорлупа кокоса и семена оливы. Их получают из различных предшественников методами физической или химической активации. Один из часто применяемых методов химической активации — термолиз углеродсодержащего предшественника в присутствии фосфорной кислоты (H_3PO_4).

Финиковые пальмы широко распространены в Египте, насчитывается 15 млн финиковых пальм.

Каждый год перерабатывается 100 000 т ветвей финиковых пальм (ВФП) в качестве сельскохозяйственных отходов. Одним из преимуществ биомассы, производимой из сельскохозяйственных побочных продуктов, является низкое содержание золы с высоким содержанием углерода. Отходы сельского хозяйства, такие как ВФП, могут быть преобразованы в активированный уголь и использованы для очистки загрязненных органическими соединениями СВ. Применение активированного угля на основе ветвей финиковой пальмы (ВФП-АУ) для данной цели не было исследовано до настоящего времени.

Цель исследования — изучение эффективности ВФП-АУ для очистки СВ, содержащих фенол. Рассмотрен процесс получения ВФП-АУ с помощью химического метода активации с применением H_3PO_4 . Разработаны модели кинетики адсорбции фенола и изотермы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Применяемые в исследовании химические реагенты были аналитической чистоты и использовались без дополнительной очистки. Все растворы приготовлены на дистиллированной воде, если не указано иное. Использовались различные реагенты, такие как фенол, NaOH (все производства «Химмед», Россия). Фосфорная кислота (H_3PO_4) 87 % приобретена в компании «Химкрафт», Россия. Для аналитического метода использовались 4-аминоантипирин («Диаэм», Россия), $K_3[Fe(CN)_6]$, KH_2PO_4 и $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ (все производства «Химкрафт», Россия).

Приготовление активированного угля из ветвей финиковой пальмы

Ветви финиковой пальмы (полученные из г. Асуан, Египет) как сырье измельчали на очень мелкие части, несколько раз промывали дистиллированной водой. Необработанные ветки сушили при температуре 105 °С в течение 24 ч в сушильном шкафу (Binder FD 53, Германия). Высушенные ветки финиковой пальмы были помечены как «ВФП». ВФП активирован методом химической активации с использованием активатора H_3PO_4 . Что касается импрегнации H_3PO_4 , 10 г сушеного ВФП смешивались с 20 мл 60 %-ного H_3PO_4 в течение 12 ч при комнатной температуре. Получившуюся смесь помещали в сушильную печь шкафа при температуре 105 °С на 12 ч для удаления влаги.

На следующем этапе образцы из H_3PO_4 /ВФП наливали в фарфоровые чашки, накрывали крышками, упаковывали в стальные трубы длиной 10 см, каждая из которых имела толщину около 2 мм, диаметр 50 мм и один узкий порт диаметром 8 мм в верхнем конце для выпуска газов. Трубы помещали в муфельную печь (SNOL 7,2/1100), которая медленно нагревалась со скоростью 10 °С/мин до достижения целевой температуры 600 °С. Затем трубы извлекали из печи

через 60 мин. Полученные образцы АУ охлаждали и подвергали повторным циклам промывки дистиллированной водой до pH = 7. ВФП-АУ помещали в фарфоровую посуду и сушили при температуре 105 °С в течение 24 ч в сушильном шкафу. Полученные образцы активированного угля маркировались как ВФП-АУ- H_3PO_4 и хранились для последующего анализа и экспериментов по адсорбции.

Эксперименты по периодической адсорбции

Выход при производстве активированного угля $Y_{АУ}$ определяется отношением массы пропитанного сырья (ВФП) к конечной массе АУ, полученной после промывки и сушки. Математически этот выход также может быть выражен уравнением:

$$Y_{АУ} = \frac{\text{Вес активированного угля}}{\text{Вес сырья (ВФП)}} \% \quad (1)$$

Проведены эксперименты с целью получения наилучшего образца АУ, полученного в результате активации ВФП. К 150 мг образцов АУ добавляли 50 мл раствора фенола с концентрацией 100 мг/дм³. Для получения оптимальных условий pH растворов регулировали до необходимого значения (в пределах от 3 до 11) с применением растворов 0,1 NaOH или 0,1 HCl. После этого к растворам фенола добавляли 150 мг ВФП-АУ- H_3PO_4 . Смеси непрерывно перемешивали в течение 240 мин для достижения равновесия при комнатной температуре с помощью установки с магнитной мешалкой. Затем каждый образец фильтровали с использованием фильтровальной бумаги с порами 0,2 мкм и подвергали анализу остаточных концентраций фенола.

Эксперименты по кинетике адсорбции фенола выполнялись в серии экспериментов с 50 мл растворов фенола с концентрацией 100 мг/дм³ и 150 мг ВФП-АУ- H_3PO_4 при pH = 7. Образцы объемом 5 мл отбирались через разные временные интервалы в порядке 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 180, 240, 480, 720 и 1440 мин.

Изотерма адсорбции фенола на ВФП-АУ- H_3PO_4 была завершена путем изучения адсорбции различных концентраций фенола (25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 мг/дм³) при 150 мг дозы ВФП-АУ- H_3PO_4 , pH = 7 и 180 мин времени равновесия. Образцы отбирались из каждого раствора через 180 мин времени равновесия и фильтровались с использованием фильтровальной бумаги с порами 0,2 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выход активированного угля

Активация с применением H_3PO_4 обеспечила высокий уровень выхода продукции (52,7 %), что подтверждает, что фосфорная кислота является эффективным активирующим агентом для гидролиза, дегидратации и оказывает влияние на создание пор [7–11].

Влияние pH

При удалении фенола pH раствора имеет значительное влияние на адсорбцию. Степень ионизации адсорбата в растворе вместе с функциональными группами, присутствующими на поверхности адсорбентов, которые известны как ответственные за поглощение адсорбата, в основном контролируются pH раствора [12]. На рис. 1 показано влияние начального pH раствора на эффективность удаления фенола полученным АУ. Выявлено, что удаление фенола увеличивается при увеличении pH до значения 7, перед тем как снизиться при значениях pH = 9 и pH = 11.

Несколько исследователей связывали стабильность удаления фенола при $\text{pH} < 9$ с его химическим взаимодействием с функциональными группами поверхности АУ (O–H и C = O) посредством механизма реакции электрон-донор-акцептор [10–12]. При этом функциональные группы АУ действуют как электрон-доноры, а фенол является электрон-акцептором. Возможно, что этот механизм реакции мог объяснить удаление фенола. Снижение адсорбции фенола может быть обусловлено двумя причинами: 1) отрицательные заряды на поверхности АУ увеличивались с увеличением pH, и фенол переходил из молекулярного состояния в ионное состояние, что делало силу отталкивания между ионами фенола и АУ значительной; 2) при таком значении pH про-

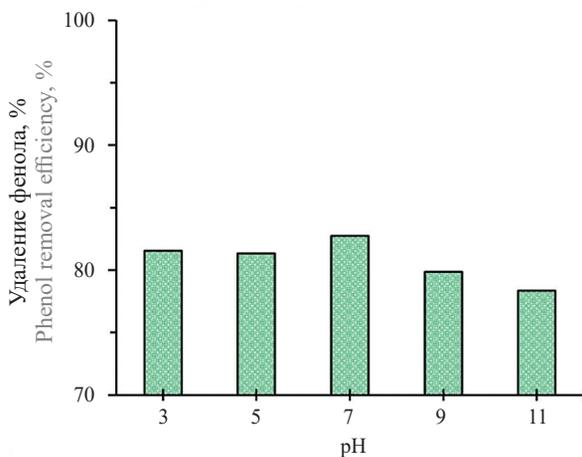


Рис. 1. Влияние изменения pH на адсорбцию фенола с использованием ВФП-АУ-Н₃Р₄ (доза АУ = 3 г/л, начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, время контакта 180 мин)

Fig. 1. Effect of pH changes on phenol adsorption using DPB-AC-H₃PO₄ (dose AC is 3 g/l, initial concentration of phenol is 100 mg/dm³, contact time is 180 minutes)

исходит диссоциация фенола, поскольку рКа фенола равно 9,98 [13]. Образующиеся анионы фенолата более растворимы в водном растворе, и для проведения адсорбции необходимо было разрушить более крепкие связи адсорбата-воды [14–16]. Благодаря высокой и стабильной эффективности удаления, замеченной в диапазоне pH от 3 до 7, значение pH = 7 выбрано как оптимальное для фенола и использовалось в других экспериментах по адсорбции.

Кинетика адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃Р₄

Исследовалось равновесие адсорбции для удаления фенола с использованием ВФП-АУ-Н₃Р₄. Как показано на рис. 2, АУ может эффективно удалить фенол из воды. Процессы адсорбции завершаются за несколько минут. Емкость адсорбции достигает примерно 25 мг/г всего за 10 мин. Кинетику адсорбции можно классифицировать на два этапа: 1) емкость адсорбции быстро увеличивается; 2) адсорбция становится очень медленной и достигает равновесия через 120 мин.

В данном исследовании кинетика адсорбции исследована с использованием моделей псевдопервого и псевдovторого порядка (рис. 3). Параметры исследованных моделей кинетики резюмированы в табл. 1. Кинетика псевдопервого порядка задается уравнением (2), кинетика псевдovторого порядка может быть представлена уравнением (3) и ее линейной формой в уравнении (4) [17–19]:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -K_1 \cdot t; \quad (2)$$

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 (q_e - q_t)^2; \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{q_e}\right)t + \frac{1}{K_2 q_e^2}. \quad (4)$$

где C_t — начальная концентрация фенола, мг/дм³; C_0 — концентрация фенола в момент времени t , мг/дм³; K_1 — константа скорости кинетики псевдопервого порядка, ч⁻¹; K_2 — константа скорости кинетики псевдovторого порядка, л/(мг·ч); q_e и q_t — количество фенола, адсорбированное на адсорбенте, мг/г, в равновесии и в момент времени t соответственно.

Табл. 1. Кинетические параметры адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃Р₄

Table 1. Kinetic parameters of phenol adsorption on DPB-AC-H₃PO₄

Образец Specimen	Параметры псевдопервого порядка Parameters of pseudo first order		Параметры псевдovторого порядка Parameters of pseudo second order		
	$K_1, \text{ч}^{-1} / \text{h}^{-1}$	R^2	$q_e, \text{мг/г}$ mgs/g	$K_2, \text{г/(мг·мин)}$ g/(mg·min)	R^2
ВФП-АУ-Н ₃ Р ₄ DPB-AC-H ₃ Р ₄	0,12	0,5748	27,40	0,0503	0,9999

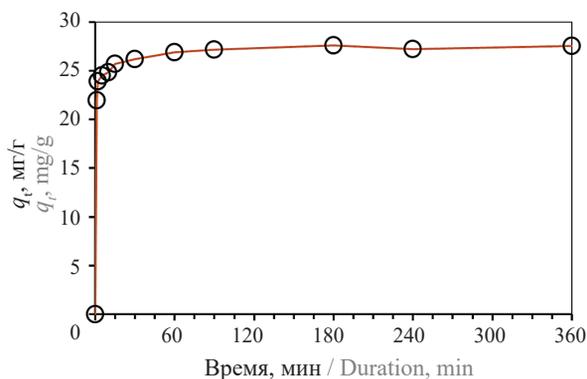


Рис. 2. Влияние времени контакта на адсорбцию фенола на ВФП-АУ-Н₃Р₀₄ (начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, доза АУ = 3 г/л, рН = 7)

Fig. 2. The effect of contact time on phenol adsorption on DPB-AC-H₃PO₄ (initial phenol concentration is 100 mg/dm³, AC dose is 3 g/l and pH is 7)

Результаты, представленные на рис. 3, 4, указывают на то, что адсорбция фенола на ВФП-АУ-Н₃Р₀₄ хорошо описывается моделью псевдвторого порядка с высоким R². Авторы работы [20] предположили, что молекулы фенола проникают во внутреннюю поверхность через контролируемую жидкостную пленку. Таким образом, поведение адсорбции фенола на активированных биочарах в основном контролируется химической адсорбцией [21, 22].

Моделирование изотермы адсорбции

Изотерма адсорбции для фенола представлена на рис. 4. Время равновесия 180 мин было предварительно установлено для кинетических экспериментов. Этот тренд впервые смоделирован с использованием изотермы Ленгмюра (рис. 5), представленной уравнением (5) и ее линеаризованной формой согласно уравнению (6). Кроме того, исследование адсорбции также адаптировано под изотерму Фрейндлиха в соответствии с моделью изотермы Фрейндлиха (уравнение (7)) и ее линеаризованной формой (уравнение (8)). Для сравнения результатов изотермы количественным образом получены и перечислены константы изотермы моделей Ленгмюра и Фрейндлиха в табл. 2.

Табл. 2. Константы изотерм адсорбции для изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха для адсорбции фенола на поверхности ВФП-АУ-Н₃Р₀₄

Table 2. Adsorption isotherms constants for Langmuir and Freundlich isotherms for phenol adsorption on the surface DPB-AC-H₃PO₄

Образец Sample	Параметры изотермы Ленгмюра Parameters of Langmuir isotherm			Параметры изотермы Фрейндлиха Parameters of Freundlich isotherm		
	q _m , мг/г mg/g	K _L , л/мг l/mg	R ²	K _F , (мг/г)(л/мг) ^{1/n} (mg/g)(l/mg) ^{1/n}	n	R ²
ВФП-АУ-Н ₃ Р ₀ ₄ DPT-AC-H ₃ Р ₀ ₄	77,52	0,0161	0,9215	12,454	3,524	0,8948

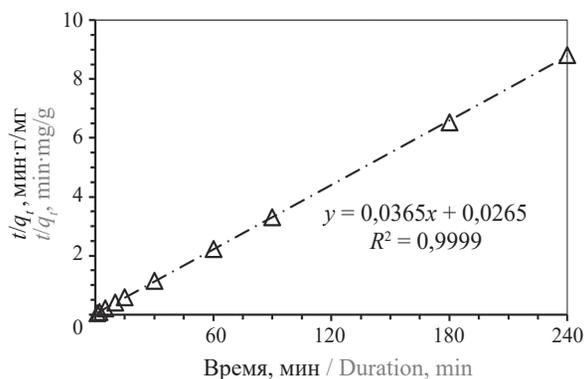


Рис. 3. Кинетическое моделирование псевдвторого порядка для образцов адсорбции фенола ВФП-АУ-Н₃Р₀₄ (начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, АУ = 3 г/л и рН = 7)

Fig. 3. Kinetic simulation of pseudo second order for phenol adsorption specimens of DPB-AC-H₃PO₄ (initial phenol concentration is 100 mg/dm³, AC dose is 3 g/l and pH is 7)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}; \tag{5}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L (q_m)} + C_e \left(\frac{1}{q_m} \right); \tag{6}$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n}; \tag{7}$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e), \tag{8}$$

где q_e — адсорбционная способность, мг/г; q_m — максимальная адсорбционная способность, мг/г; K_L — постоянная Ленгмюра, л/мг; C_e — равновесная концентрация фенола, мг/дм³; n — интенсивность адсорбции; K_F — коэффициент емкости Фрейндлиха, (мг/г)(л/мг)^{1/n}.

Коэффициенты корреляции R² для обеих моделей при 25 °С позволяют сделать вывод, что эмпирическое уравнение Ленгмюра (R² = 0,9215) более удобно, чем уравнение Фрейндлиха (R² = 0,8949), для описания адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃Р₀₄. Отмечается постепенное увеличение емкости адсорбции q_e при увеличении значения C_e. Емкость адсорбции также увеличивается с 8 до 70 мг/г до достижения плато, указывая на формирование одно-

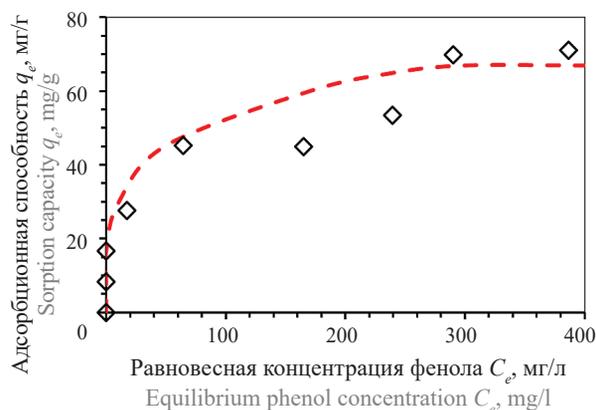


Рис. 4. Изотерма адсорбции поглощения фенола двумя образцами АУ (3 г/дм³ АУ, рН = 7 и время контакта 180 мин)

Fig. 4. The adsorption isotherm of phenol adsorption by two specimens of AC (dose of AC is 3 g/dm³, pH is 7 and contact time is 180 min)

слояного покрытия. Другими словами, продукт АУ имел равномерное межфазное место адсорбции для фенола [23].

Изначально увеличение адсорбции фенола с ростом его начальной концентрации в воде может быть обусловлено более высокой силой массопереноса от объемной водной фазы к объемной твердой фазе. Тем не менее по мере достижения насыщенного состояния доступных мест чистая адсорбция также стабилизируется из-за установления равновесия между поверхностью материала АУ и фенолом [24]. Чтобы сравнить эффективность ВФП-АУ-Н₃Р₄ в удалении фенола из водной среды, выполнено сравнение с другими активированными углями, полученными из отходов. По сравнению с предыдущими исследованиями [25–31] максимальная емкость адсорбции фенола q_{\max} составляет 77,52 мг/г для ВФП-АУ-Н₃Р₄, что выше значений, приведенных в литературе. Это говорит о том, что ВФП-АУ-Н₃Р₄ представляет собой многообещающий адсорбент, который может быть использован для удаления фенола.

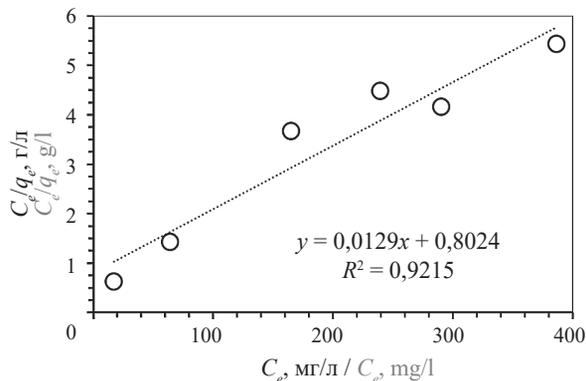


Рис. 5. Изотерма адсорбции Ленгмюра для адсорбции фенола с использованием АУ (3 г/дм³ АУ, рН = 7 и время контакта 180 мин)

Fig. 5. Langmuir adsorption isotherm for phenol adsorption using AC (dose of AC is 3 g/dm³, pH is 7 and contact time is 180 min)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ветви финиковой пальмы были успешно преобразованы в пористый АУ химической активацией с использованием Н₃Р₄ в качестве активирующего агента, чтобы стать возобновляемым и многообещающим адсорбентом для удаления фенола из воды. Исследовалось влияние начального значения рН, начальной концентрации фенола, времени контакта на эффективность процесса адсорбции. Результаты по емкостям адсорбции и эффективности удаления показали, что ВФП-АУ-Н₃Р₄ обладает более высокой активностью к фенолу. Экспериментальные данные по изотерме, скоррелированные с применением моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, показали, что модель Ленгмюра дала наилучшее соответствие. Более того, данные по равновесной адсорбции оказались наилучшими для модели второго порядка, что указывает на то, что механизм адсорбции обусловлен хемисорбцией, вызванной обменом электронами между фенолом и функциональными группами поверхности активированного угля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Артемьянов А.П., Земскова Л.А., Иванов В.В.* Каталитическое жидкофазное окисление фенола в водных средах с использованием катализатора углеродное волокно / (железо, оксид железа) // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 8. С. 88–95. DOI: 10.6060/tcst.2017608.5582. EDN ZDNKPD.

2. *Тамаркина Ю.В., Анищенко В.Н., Редько А.Н., Кучеренко В.А.* Адсорбция фенола активированными углями на основе ископаемых углей разной степени метаморфизма // Химия твердо-

го топлива. 2021. № 3. С. 3–11. DOI: 10.31857/S002311721030105. EDN JWZHPL.

3. *Yohi S., Wu C.-M., Koodali R.T.* A kinetic study of photocatalytic degradation of phenol over titania-silica mixed oxide materials under UV illumination // Catalysts. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 193. DOI: 10.3390/catal12020193

4. *Beloborodova N., Bairamov I., Olenin A., Shubina V., Teplova V., Fedotcheva N.* Effect of phenolic acids of microbial origin on production of reactive oxygen species in mitochondria and neutrophils //

Journal of Biomedical Science. 2012. Vol. 19. Issue 1. DOI: 10.1186/1423-0127-19-89

5. *Michalowicz J., Duda W.* Phenols — sources and toxicity // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. Vol. 16. Issue 3. Pp. 347–362. EDN MFIKYZ.

6. *Liew R.K., Chong M.Y., Osazuwa O.U., Nam W.L., Phang X.Y., Su M.H., Cheng C.K.* Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation // Research on Chemical Intermediates. 2018. Vol. 44. Issue 6. Pp. 3849–3865. DOI: 10.1007/s11164-018-3388-y

7. *Enaïme G., Ennaciri K., Ounas A., Bacaoui A., Seffen M., Selmi T.* Preparation and characterization of activated carbons from olive wastes by physical and chemical activation: application to indigo carmine adsorption // Journal of Materials and Environmental Sciences. 2017. Vol. 8. Issue 11. Pp. 4125–4137.

8. *Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M.* Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H_3PO_4 , $ZnCl_2$ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 178. P. 114546. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114546

9. *Gupta A., Balomajumder C.* Simultaneous adsorption of Cr(VI) and phenol from binary mixture using iron incorporated rice husk: insight to multicomponent equilibrium isotherm // International Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2016/7086761

10. *Gupta A., Garg A.* Primary sewage sludge-derived activated carbon: Characterisation and application in wastewater treatment // Clean Technologies and Environmental Policy. 2015. Vol. 17. Issue 6. Pp. 1619–1631. DOI: 10.1007/s10098-014-0895-4

11. *Kacan E.* Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 166. Pp. 116–123. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.044

12. *Gundogdu A., Duran C., Senturk H.B., Soy-lak M., Ozdes D., Serencam H. et al.* Adsorption of phenol from aqueous solution on a low-cost activated carbon produced from tea industry waste: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic study // Journal of Chemical & Engineering Data. 2012. Vol. 57. Issue 10. Pp. 2733–2743. DOI: 10.1021/jc300597u

13. *Dąbrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M.* Adsorption of phenolic compounds by activated carbon : a critical review // Chemosphere. 2005. Vol. 58. Issue 8. Pp. 1049–1070. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.067

14. *Busca G., Berardinelli S., Resini C., Arri-ghi L.* Technologies for the removal of phenol from fluid streams : a short review of recent developments // Jour-

nal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 160. Issue 2–3. Pp. 265–288. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045

15. *Lü G., Hao J., Liu L., Ma H., Fang Q., Wu L. et al.* The adsorption of phenol by lignite activated carbon // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 19. Issue 3. Pp. 380–385. DOI: 10.1016/S1004-9541(09)60224-x

16. *Yang G., Chen H., Qin H., Feng Y.* Amination of activated carbon for enhancing phenol adsorption: Effect of nitrogen-containing functional groups // Applied Surface Science. 2014. Vol. 293. Pp. 299–305. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.12.155

17. *Ho Y.S., McKay G.* Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. 1999. Vol. 34. Issue 5. Pp. 451–465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5

18. *Vieira A.P., Santana S.A.A., Bezerra C.W.B., Silva H.A.S., Chaves J.A.P., de Melo J.C.P. et al.* Kinetics and thermodynamics of textile dye adsorption from aqueous solutions using babassu coconut mesocarp // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 166. Issue 2–3. Pp. 1272–1278. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.043

19. *Qiu H., Lv L., Pan B., Zhang Q.Q., Zhang W., Zhang Q.Q.* Critical review in adsorption kinetic models // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2009. Vol. 10. Issue 5. Pp. 716–724. DOI: 10.1631/jzus.A0820524

20. *Fu Y., Shen Y., Zhang Z., Ge X., Chen M.* Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 646. Pp. 1567–1577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.423

21. *Shi R., Li Y., Yin J., Yang S.* Preparation of activated carbon from corn straw and research of adsorption kinetics // Chinese Journal of Environmental Engineering. 2014. Vol. 8. Issue 8. Pp. 3428–3432.

22. *Al-Malack M.H., Dauda M.* Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017. Vol. 5. Issue 3. Pp. 2718–2729. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.027

23. *Yener J., Kopac T., Dogu G., Dogu T.* Dynamic analysis of sorption of Methylene Blue dye on granular and powdered activated carbon // Chemical Engineering Journal. 2008. Vol. 144. Issue 3. Pp. 400–406. DOI: 10.1016/j.cej.2008.02.009

24. *Srivastava V.C., Swamy M.M., Mall I.D., Prasad B., Mishra I.M.* Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2006. Vol. 272. Issue 1–2. Pp. 89–104. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.07.016

25. *Makrigianni V., Giannakas A., Deligiannakis Y., Konstantinou I.* Adsorption of phenol and methylene blue from aqueous solutions by pyrolytic tire

char: Equilibrium and kinetic studies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. Issue 1. Pp. 574–582. DOI: 10.1016/j.jece.2015.01.006

26. Sierra I., Iriarte-Velasco U., Cepeda E.A., Gameiro M., Aguayo A.T. Preparation of carbon-based adsorbents from the pyrolysis of sewage sludge with CO₂ Investigation of the acid washing procedure // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. Issue 34. Pp. 16053–16065. DOI: 10.1080/19443994.2015.1075428

27. Kumar A., Jena H.M. Removal of methylene blue and phenol onto prepared activated carbon from Fox nutshell by chemical activation in batch and fixed-bed column // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137. Pp. 1246–1259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.177

28. Shen Y., Fu Y. KOH-activated rice husk char via CO₂ pyrolysis for phenol adsorption // *Materials Today Energy*. 2018. Vol. 9. Pp. 397–405. DOI: 10.1016/j.mtener.2018.07.005

29. Da Gama B.M.V., do Nascimento G.E., Sales D.C.S., Rodriguez-Díaz J.M., de Menezes Barbosa C.M.B., Duarte M.M.M.B. Mono and binary component adsorption of phenol and cadmium using adsorbent derived from peanut shells // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 201. Pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.291

30. Kilic M., Apaydin-Varol E., Pütün A.E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics and thermodynamics // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 189. Issue 1–2. Pp. 397–403. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.051

31. Singh K.P., Malik A., Sinha S., Ojha P. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 150. Issue 3. Pp. 626–641. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.017

Поступила в редакцию 29 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 января 2024 г.

Одобрена для публикации 26 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ахмед Самех Абдельфаттах Араби** — ассистент лектора; **Асуанский университет**; 81542, г. Асуан, Египет; аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 58308783500, ORCID: 0000-0003-2845-2749; Sameh.araby@aswu.edu.eg;

Елена Сергеевна Гогина — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4809-5910; gogina-es@yandex.ru;

Николай Алексеевич Макиша — кандидат технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Artem'yanov A.P., Zemskova L.A., Ivanov V.V. Catalytic liquid-phase oxidation of phenol in aqueous media using a carbon fiber catalyst. *ChemChemTech*. 2017; 60(8):88-95. DOI: 10.6060/tcct.2017608.5582. EDN ZDNKPD. (rus.).

2. Tamarkina Iu.V., Anishchenko V.N., Red'ko A.N., Kucherenko V.A. Adsorption of phenol by activated carbons based on fossil carbons of varying degrees of metamorphism. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2021; 3:3-11. DOI: 10.31857/S0023117721030105. EDN JWZHPL. (rus.).

3. Yohi S., Wu C.-M., Koodali R.T. A kinetic study of photocatalytic degradation of phenol over titania-silica mixed oxide materials under UV illumination. *Catalysts*. 2022; 12(2):193. DOI: 10.3390/catal12020193

4. Beloborodova N., Bairamov I., Olenin A., Shubina V., Teplova V., Fedotcheva N. Effect of phenolic acids of microbial origin on production of reactive oxygen species in mitochondria and neutrophils. *Journal of Biomedical Science*. 2012; 19(1). DOI: 10.1186/1423-0127-19-89

5. Michałowicz J., Duda W. Phenols — Sources and Toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007; 16(3):347-362. EDN MFIKYZ.

6. Liew R.K., Chong M.Y., Osazuwa O.U., Nam W.L., Phang X.Y., Su M.H., Cheng C.K. Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation. *Research on Chemical Intermediates*. 2018; 44(6):3849-3865. DOI: 10.1007/s11164-018-3388-y

7. Enaime G., Ennaciri K., Ounas A., Bacaoui A., Seffen M., Selmi T. Preparation and characterization of activated carbons from olive wastes by physical and chemical activation: application to indigo carmine adsorption. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2017; 8(11):4125-4137.
8. Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M. Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H_3PO_4 , $ZnCl_2$ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*. 2022; 178:114546. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114546
9. Gupta A., Balomajumder C. Simultaneous Adsorption of Cr(VI) and Phenol from Binary Mixture Using Iron Incorporated Rice Husk: Insight to Multicomponent Equilibrium Isotherm. *International Journal of Chemical Engineering*. 2016; 2016:1-11. DOI: 10.1155/2016/7086761
10. Gupta A., Garg A. Primary sewage sludge-derived activated carbon: Characterisation and application in wastewater treatment. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2015; 17(6):1619-1631. DOI: 10.1007/s10098-014-0895-4
11. Kacan E. Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal. *Journal of Environmental Management*. 2016; 166:116-123. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.044
12. Gundogdu A., Duran C., Senturk H.B., Soylak M., Ozdes D., Serencam H. et al. Adsorption of phenol from aqueous solution on a low-cost activated carbon produced from tea industry waste: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic study. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012; 57(10):2733-2743. DOI: 10.1021/jc300597u
13. Dąbrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon : a critical review. *Chemosphere*. 2005; 58(8):1049-1070. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.067
14. Busca G., Berardinelli S., Resini C., Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams : a short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 160(2-3):265-288. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045
15. Lü G., Hao J., Liu L., Ma H., Fang Q., Wu L. et al. The adsorption of phenol by lignite activated carbon. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2011; 19(3):380-385. DOI: 10.1016/S1004-9541(09)60224-x
16. Yang G., Chen H., Qin H., Feng Y. Amination of activated carbon for enhancing phenol adsorption: Effect of nitrogen-containing functional groups. *Applied Surface Science*. 2014; 293:299-305. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.12.155
17. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 1999; 34(5):451-465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5
18. Vieira A.P., Santana S.A.A., Bezerra C.W.B., Silva H.A.S., Chaves J.A.P., de Melo J.C.P. et al. Kinetics and thermodynamics of textile dye adsorption from aqueous solutions using babassu coconut mesocarp. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 166(2-3):1272-1278. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.043
19. Qiu H., Lv L., Pan B., Zhang Q.Q., Zhang W., Zhang Q.Q. Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2009; 10(5):716-724. DOI: 10.1631/jzus.A0820524
20. Fu Y., Shen Y., Zhang Z., Ge X., Chen M. Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption. *Science of the Total Environment*. 2019; 646:1567-1577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.423
21. Shi R., Li Y., Yin J., Yang S. Preparation of activated carbon from corn straw and research of adsorption kinetics. *Chinese Journal of Environmental Engineering*. 2014; 8(8):3428-3432.
22. Al-Malack M.H., Dauda M. Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017; 5(3):2718-2729. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.027
23. Yener J., Kopac T., Dogu G., Dogu T. Dynamic analysis of sorption of Methylene Blue dye on granular and powdered activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2008; 144(3):400-406 DOI: 10.1016/j.ccej.2008.02.009
24. Srivastava V.C., Swamy M.M., Mall I.D., Prasad B., Mishra I.M. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006; 272(1-2):89-104. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.07.016
25. Makrigianni V., Giannakas A., Deligiannakis Y., Konstantinou I. Adsorption of phenol and methylene blue from aqueous solutions by pyrolytic tire char: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015; 3(1):574-582. DOI: 10.1016/j.jece.2015.01.006
26. Sierra I., Iriarte-Velasco U., Cepeda E.A., Gamero M., Aguayo A.T. Preparation of carbon-based adsorbents from the pyrolysis of sewage sludge with CO_2 . Investigation of the acid washing procedure. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57(34):16053-16065. DOI: 10.1080/19443994.2015.1075428
27. Kumar A., Jena H.M. Removal of methylene blue and phenol onto prepared activated carbon from Fox nutshell by chemical activation in batch and fixed-bed column. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 137:1246-1259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.177
28. Shen Y., Fu Y. KOH-activated rice husk char via CO_2 pyrolysis for phenol adsorption. *Materials Today Energy*. 2018; 9:397-405. DOI: 10.1016/j.mtener.2018.07.005
29. Da Gama B.M.V., do Nascimento G.E., Sales D.C.S., Rodríguez-Díaz J.M., de Menezes Barbo

sa C.M.B., Duarte M.M.M.B. Mono and binary component adsorption of phenol and cadmium using adsorbent derived from peanut shells. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 201:219-228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.291

30. Kilic M., Apaydin-Varol E., Pütün A.E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics

and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 189(1-2):397-403. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.051

31. Singh K.P., Malik A., Sinha S., Ojha P. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 150(3):626-641. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.017

Received December 29, 2023.

Adopted in revised form on January 26, 2024.

Approved for publication on January 26, 2024.

BIOTNOTES: **Ahmed Sameh** — assistant lecturer; **Aswan University**; Aswan, 81542, Egypt; postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 58308783500, ORCID: 0000-0003-2845-2749; Sameh.araby@aswu.edu.eg;

Elena S. Gogina — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Structures; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklouho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; chief researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4809-5910; gogina-es@yandex.ru;

Nikolay A. Makisha — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center “Water Supply and Sanitation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made equal contribution to the paper.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

UDC 69.051

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455

Using Building Information Modelling (BIM) by studying building orientation during design to achieve more sustainable buildings

Jamal Younes Omran, Moustafa Ali Wassouf

Tishreen University; Lattakia, Syria

ABSTRACT

Introduction. Energy is one of the most important issues that attract the attention of the whole world, and this in turn is reflected in the increase in energy consumption in residential and industrial buildings. Therefore, the process of assessing the efficiency and quality of interior spaces is an important step from which the process of developing and upgrading these spaces begins to reach a sustainable model from an environmental, economic and social point of view.

Materials and methods. The research aims to study the distribution patterns of residential divisions and their reflection on the energy of a residential suburb consisting of twenty residential buildings in Tartous Governorate, through the development of a software tool using Dynamo, which is one of the visual programming methods used in (BIM) using a programming language (Python) with the addition of studying heating and air conditioning loads for current orientation with comparison with loads after directing the building at different angles in order to reduce consumption and benefit from solar radiation sources through Revit. An analytical approach was used, through the analysis and extrapolation of the literature and references related to the study, in addition to the deductive approach by deducing problems in the current situation and providing suggestions for solutions that can be followed in the management and analysis of energy.

Results. The BIM approach contributed to the study of the building orientation and its reflection on thermal loads, taking into account all the factors causing this load, which can be adjusted according to any requirements or code.

Conclusions. Studying the building orientation during the design stage contributes to reducing the total annual heat load by more than 20 %, and this percentage varies according to the way buildings are assembled.

KEYWORDS: Building Information Modelling, Visual programming, building orientation, design phase, sustainability, shadow study, the building envelope, building orientation

FOR CITATION: Jamal Younes Omran, Moustafa Ali Wassouf. Using Building Information Modelling (BIM) by studying building orientation during design to achieve more sustainable buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):436-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455 (rus.).

Corresponding author: Moustafa Ali Wassouf, mosstafa11@gmail.com.

Использование информационного моделирования строительных объектов (BIM) с целью изучения ориентации здания при проектировании для достижения их большей устойчивости

Джамал Юнис Омран, Мустафа Али Вассуф

Университет Тишрин; г. Латакия, Сирия

АННОТАЦИЯ

Введение. Энергетика — один из наиболее актуальных вопросов. В связи с увеличением потребления энергии в жилых и промышленных зданиях оценка эффективности и качества внутренних помещений является важным шагом, с которого начинается процесс разработки и внедрения новых технологий. Модернизация данных пространств приводит к созданию устойчивой модели с экологической, экономической и социальной точек зрения.

Материалы и методы. Цель исследования — изучение закономерностей распределения жилых кварталов и их отражение на энергетике жилого пригорода, состоящего из двадцати жилых зданий в провинции Тартус, благодаря разработке программного инструмента с использованием программы Дупато, который служит одним из методов визуального программирования, используемых в BIM, с применением языка программирования Python. Исследованы нагрузки на отопление и кондиционирование воздуха для данной ориентации в сравнении с нагрузками после проектирования здания под разными углами, чтобы снизить потребление и извлечь выгоду из источников солнечного света с помощью Revit. Используются аналитический подход, основанный на анализе и экстраполяции литературы, связанной с исследованием; дедуктивный подход путем определения проблем и предоставления предложений по решениям, которым можно следовать при управлении и анализе энергии.

Результаты. BIM-подход способствовал изучению ориентации здания и ее отражения на тепловых нагрузках с уче-

том всех факторов, вызывающих эту нагрузку, которые могут быть скорректированы в соответствии с требованиями или нормами.

Выводы. Исследование ориентации здания на стадии проектирования способствует снижению общей годовой тепловой нагрузки более чем на 20 %, этот процент варьируется в зависимости от способа сборки зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование строительных объектов, визуальное программирование, ориентация здания, этап проектирования, устойчивость, изучение расположения тени, ограждающая конструкция здания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Джамал Ю.О., Мустафа А.В. Using Building Information Modelling (BIM) by studying building orientation during design to achieve more sustainable buildings // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 436–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455

Автор, ответственный за переписку: Мустафа Али Вассуф, mosstafa11@gmail.com.

INTRODUCTION

Modifying existing buildings offers great opportunities to reduce energy consumption and carbon emissions because buildings consume the most energy [1]. The research methodology based on Building Information Modelling (BIM) technology is considered one of the new technologies for retrofitting buildings to achieve low energy housing and reduce environmental impact [2]. The construction trend in sustainable design is defined as the way a building is placed on its position relative to the path of the sun and how the building handles the sun and how the glass openings are identified can have a significant impact on the energy efficiency of the building's systems and the comfort of the residents. Because the right orientation prepares the building to optimize passive solar-based and sometimes wind-based strategies, it naturally creates less energy solutions for lighting, heating and cooling [3]. Building Information Modelling (BIM) has the potential to help designers evaluate different design alternatives and select bioenergy strategies and systems at the design stage of proposed projects [4]. Linking the energy analysis tool to the BIM model helps speed up the energy analysis process, provide more detailed and accurate results, as well as provide energy-efficient buildings [5]. This research attempts to shed light on the issue of energy cost savings in construction projects during the design phase within the BIM environment with the aim of reaching sustainable energy-efficient buildings that benefit from sunlight and reduce fossil energy consumption, especially in residential buildings, which rank second in consumption [6]. Building energy use is expected to increase by 32 % by 2040 [7]. Where the most effective decisions regarding the sustainable design of a building can only be made at the design and pre-construction stages [8].

Many researchers have studied the effects of using BIM in examining project performance in terms of sustainability, and some research has focused on studying the possibility of BIM in supporting the design team to make the right design decisions early in the design phase and providing a model for a working mechanism to integrate building performance simulation for energy in the design phase [9]. In addition to correlation analysis of factors affecting cooling energy demand

in residential units, energy use for heating, ventilation and air conditioning is often the main contributor to operational energy demand, which ranges between 50–70 % in most developed countries [10]. Some research has conducted energy analysis of residential buildings and various facilities at the end of the design phase, and once the building components and elements are selected from the orientation, shape, height, type and thickness of walls, type of glass, and thickness of ceilings and floors, however, the analysis of the energy consumption of these components at the conceptual design stage is very useful for designers to make decisions regarding the selection of the most appropriate design alternative that will lead to an energy-efficient construction [4]. Research has shown that design decisions have a significant impact on energy consumption in residential buildings, as the results showed a significant decrease in the energy consumed as a result of changing the orientation of the building, the area of windows and the addition of insulation layers to the external walls. The results also showed that the penetration of direct sunlight into the voids is the main source of heat and the first responsible for the high energy consumption in this sector of buildings. It showed that this source is responsible for 55 % of energy consumption followed by thermal conductivity through the building's outer sheath materials [11]. After reviewing the results of previous studies, the research localizes a global technology and shows the strong features of BIM in the field of building energy analysis and studying the impact of changing building distribution patterns and methods of assembly and direction on the total energy consumption costs.

Purpose of the study

Propose a methodology that allows the designer to study the percentage of utilization of natural solar radiation (during winter) or protection from it (during summer), in order to predict the thermal performance of the building, through an additional tool developed using visual programming, as well as calculate the necessary thermal loads (for heating and air conditioning). With the reorientation of the building at different angles in order to study the impact of the orientation of the building on energy consumption costs, up to the proposal of suitable materials for the building envelope that provide good thermal insulation, and thus contribute

to reducing the annual thermal load. To achieve this, the following steps were followed:

- building a 3D model using Revit that represents the case studied (residential buildings);
- designing a tool to predict the rates of utilization of solar radiation by nature (during the winter season) or protection from it (during the summer season) and using it on the studied situation;
- calculation of the loads necessary for heating and air conditioning of the studied residential buildings in the case of real orientation with recalculation of this load after changing the orientation by 5 and 10 degrees counterclockwise from the current situation;
- proposing and designing an additional tool by Dynamo and Python to achieve the building envelope for the design requirements of the thermal insulation code in order to reduce thermal leakage, because the materials used in this envelope have high thermal transfer coefficients.

MATERIALS AND METHODS

Collection of research data

All the data and plans necessary for the research were collected from the residential suburb project (Sheikh Saad node), consisting of twenty buildings, located in Tartous Governorate, and each building consists of a ground floor and sixteen repeated floors with a total height of (55.7 m). The floor area is (745 m²). Each floor consists of eight apartments with a floor area per apartment (70 m²). The following is the projection of the general location of the studied residential suburb Fig. 1.

Data analysis

The study tools were used, namely.

The use of BIM helps reduce the cost of sustainable buildings [12], where Software developers have integrated the visual programming language into BIM

programmes [13], and it is important to develop energy simulation methods at the early design stage and this is done using the latest tools, the newly developed VP (Visual Programming) (Dynamo) along with the Autodesk Revit design tool [8]:

- where Dynamo is used within Revit to automatically extract asset management data from the form and export the data to a special format required by the facility owner [14];
- Autodesk Revit 2020: BIM application tool helps to 3D modelling and simulation of the building energy modelling (BEM) in addition to calculating thermal loads for heating and air conditioning;
- Dynamo 2020 Autodesk: A visual programming tool integrated into the Revit programme, which was used to facilitate the energy analysis process;
- Python language: It is a programming language that was used in visual modelling as it is compatible with Dynamo;
- Insight 360: which is an addition within the Revit programme was used to calculate the amount of solar radiation falling on the facades of buildings for the studied case. Linking the energy analysis tool to the BIM model helps speed up the energy analysis process, provide more detailed and accurate results, as well as provide energy-efficient buildings [8].

Analytical Study of the Project in the Environment (BIM)

Based on the data collected, the following figure shows the results of modelling the residential suburb in the Revit programme (Fig. 2).

“Shadow Study” results

The following figure shows the nodes of the tool used to study the formed shadows and their effect



Fig. 1. Description of the general site with the placement of buildings (organizational scheme)



Fig. 2. Revit modelling results

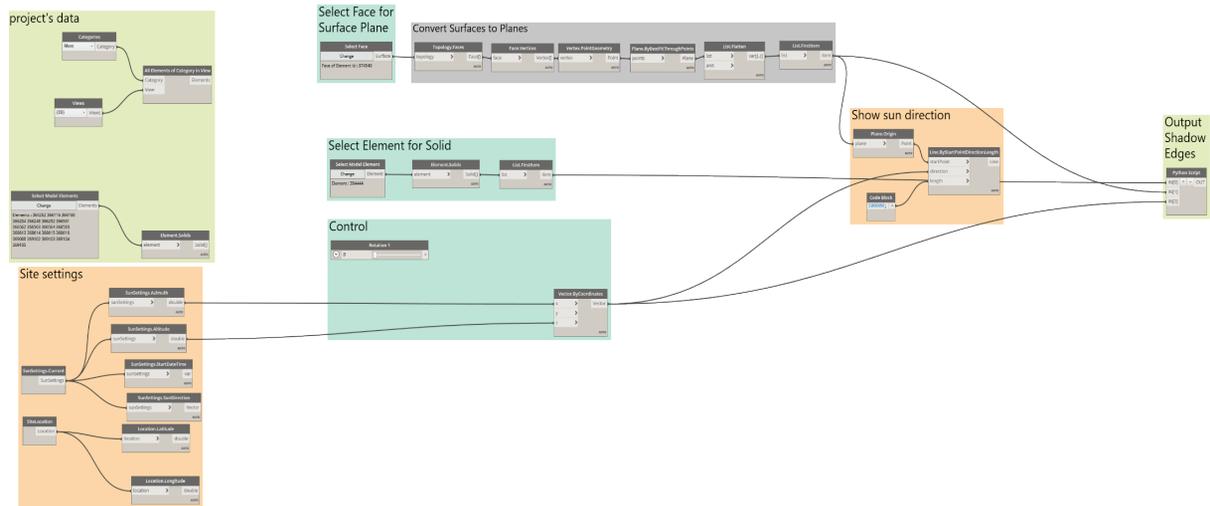


Fig. 3. Shadow Study node components in Dynamo software

on neighboring buildings every hour of the year for each type of denominator (continuous and alternating) of the studied case (Fig. 3).

Continuous assembly of buildings

This method is characterized by peripheral aspects from all sides around the residential building, and

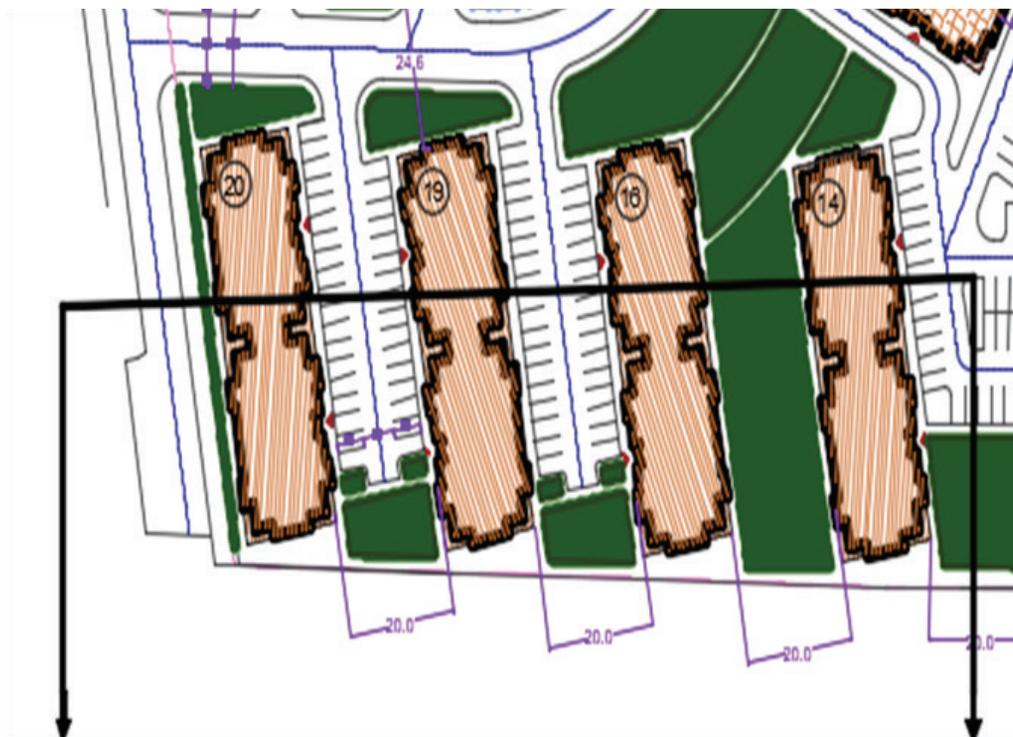


Fig. 4. North-South continuous assembly axis

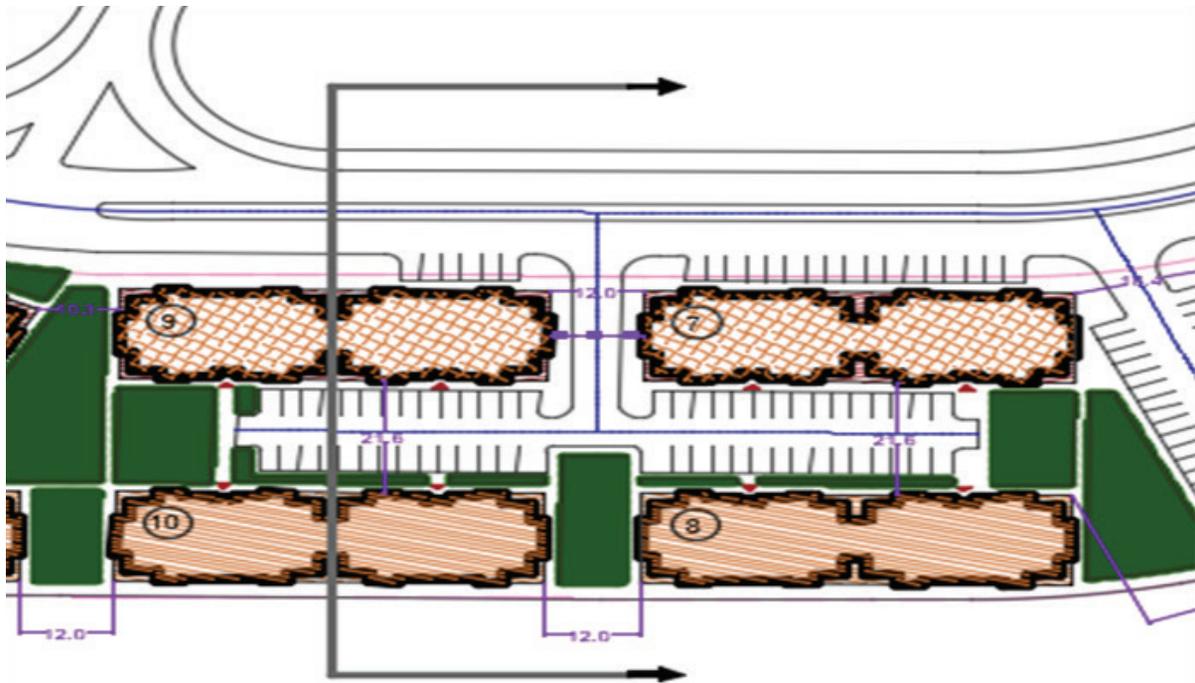


Fig. 5. East-West continuous assembly axis

the residential sections are adjacent from two or three sides, and this grouping affects the buildings that will be built within these sections through.

When the longitudinal direction of this grouping, as in Fig. 4 is north-south, it will lead to the fact that the buildings located within the partitions that are located on the southern side, which will benefit from the winter sun, are few in number because the percentage of buildings located in the shadow area will be large.

When the longitudinal orientation of the assembly method is towards east-west Fig. 5 the buildings located within the residential complex, which are reached

by the sun's rays in winter on the southern side, will be half of the buildings, since the buildings located on the northern side will be located in the shadow area thrown by the southern buildings.

Grouping of buildings alternately

This method is characterized by the fact that the front divider is displaced from the rear divider by half the length of the divider, and this displacement helps in the arrival of the sun's favoured rays from the southern side when the longitudinal direction of the assembly is east-west to the rear buildings through the distances between the front buildings as in Fig. 6.

When the longitudinal direction of the alternating assembly is towards the north-south, the buildings located within the front sections of the southern side are exposed to the winter sun, while the buildings located on the northern side are not exposed in the southern facade to sunlight in the winter because of the shadow of the building on it, as in Fig. 7.

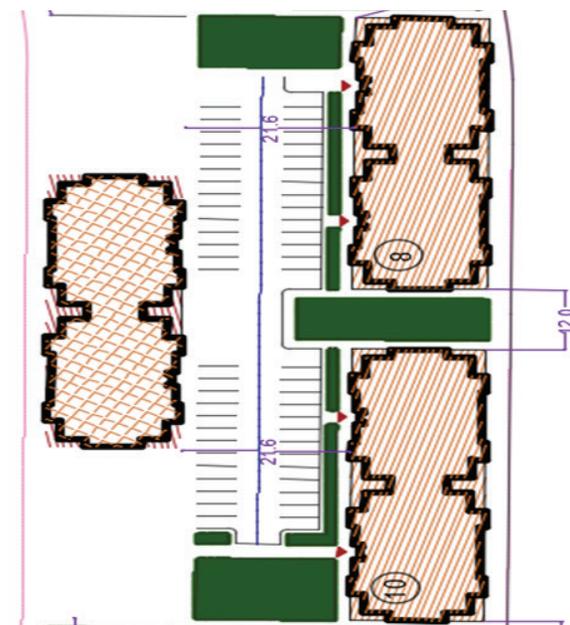


Fig. 6. East-west alternating assembly axis

RESULTS

Calculation of heat loads for heating and air conditioning using Revit

We will calculate the heat load for each type of divider in its current state and then we will redirect these blocks at certain angles provided that the rotation angle does not exceed 10 degrees [3] because this will affect the system of partitions adopted in the division. The direction of the building should be seriously considered, especially in the equatorial zone according to the interaction of the building envelope with solar radiation as well as the direction of the wind [15].

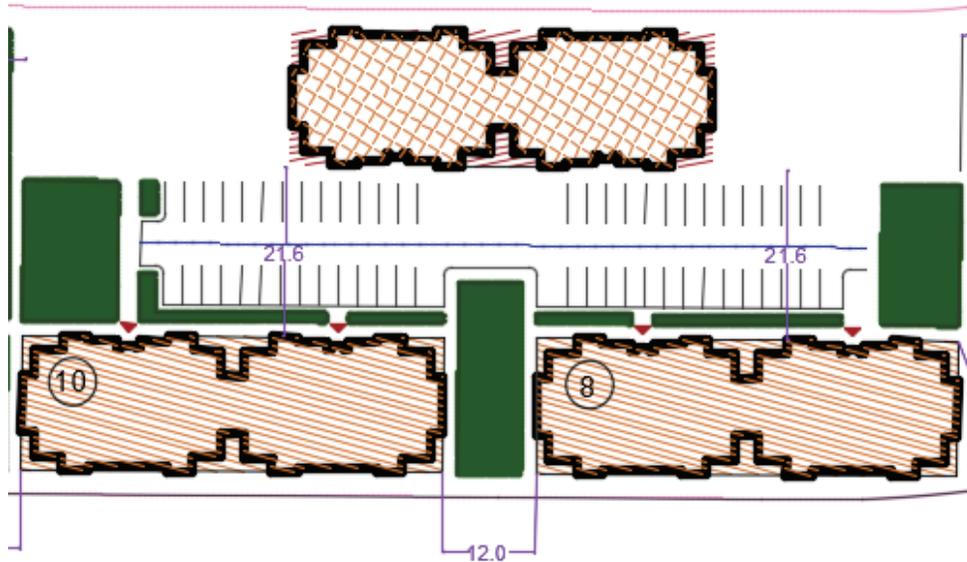


Fig. 7. North-south alternating assembly axis

After completing the modelling, we defined the spaces into rooms, which would be cooled and heated, and include living rooms and bedrooms, and then we defined the vertical zones, which is the group of space located in one plane, where all the data and special parameters necessary to calculate the heat load were entered in the Revit programme, shown in Table 1.

After defining all the parameters of the building, we will define the properties of the space for each room as shown in Fig. 8. Most of the previous properties and parameters are calculated by the Revit when determining the type of space, such as the space allocated per

person, the number of people, the heat emitted from them, the thermal energy from electrical appliances, the rate of ventilation and the required lighting, as these values have been modified according to the Syrian thermal insulation code, in addition to developing room occupancy plans, which greatly affects the heat load, so the presence of the person within the room means the need to achieve comfort for him, i.e. the operation of air conditioning or heating systems, and the following are the occupancy plans for the rooms (Fig. 9, 10).

After completing the definition of the properties of all spaces, the last step is to define the properties and parameters of the zone (Fig. 11).

Table 1. Parameters of calculating the heat load on the Revit programme

Parameter	Value	Explanation
Building Type	Multi Family	It is important to determine the type of building for which the load is to be calculated because this affects its occupancy rate and the number of operating hours
Location	Tartous (34.9–35.9)	When you select the location, the programme imports weather data from the daily temperature and the degree of clarity of the atmosphere
Ground Plane	Level 1	The programme takes into account the floors adjacent to the soil when determining the ground floor level
Sliver Space Tolerance	12 m	The programme asks for special tolerance limits between buildings, i.e. whether there are buildings adjacent to the studied building
Building Envelope	Split System(s) with Natural Ventilation	Type of air conditioning and heating system to be installed
Schematic Types	<Building>	The type of building structure, is it resistant to heat transfer due to insulation or not because this will affect the heat transfer with the external medium
Building Infiltration Class	Medium	The degree of immunity of the building and takes three values (heavy, medium, low) if the type of building is heavy and the peak hour is one in the afternoon, the building will need time to transfer heat (it will trap the maximum external temperature) and the peak hour inside the building is at three o'clock in the afternoon and this factor relates to the type of structure and the degree of insulation

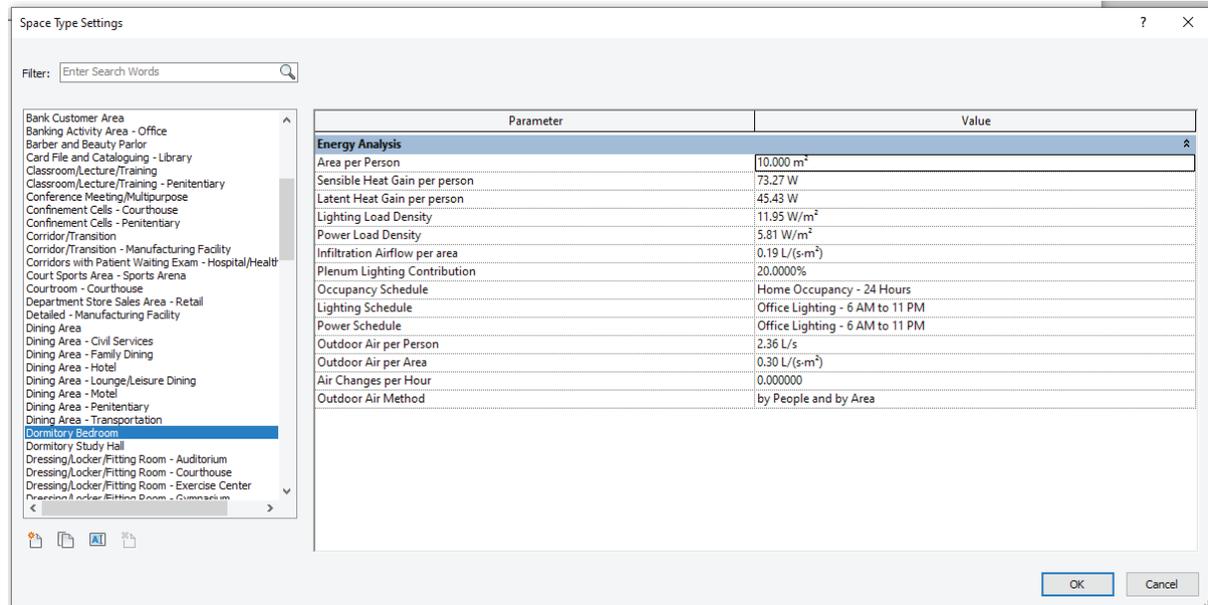


Fig. 8. Properties of Space

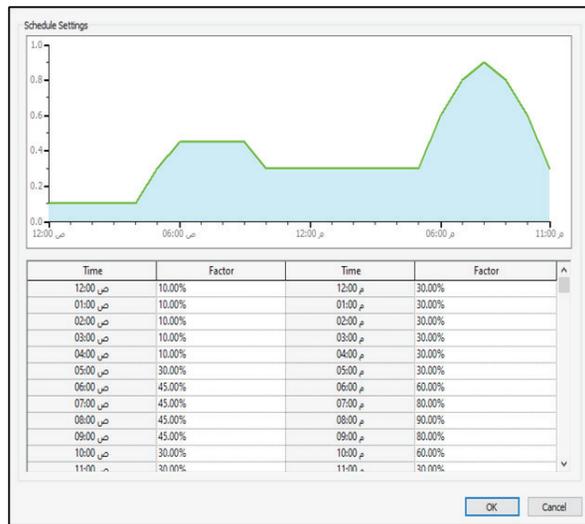


Fig. 9. 24-hour space occupancy chart for bedroom

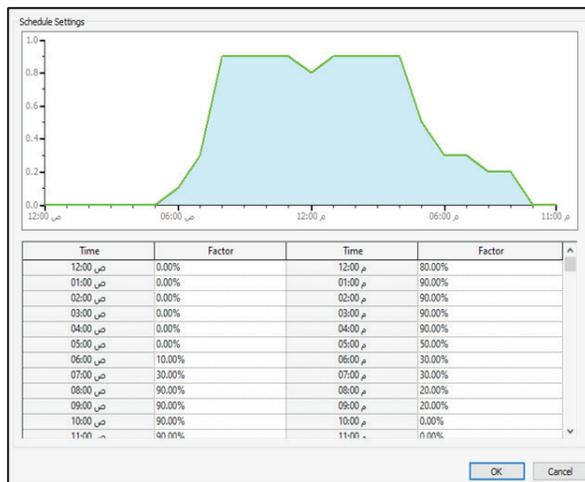


Fig. 10. 24-hour luminance usage rate diagram for bedroom

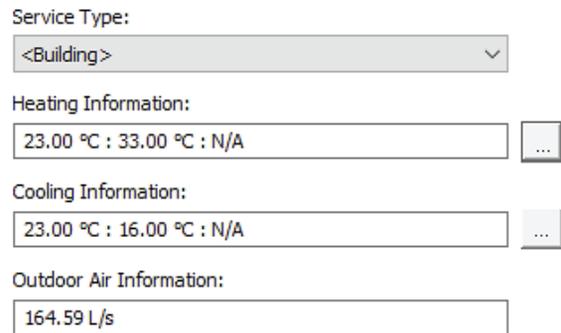


Fig. 11. Properties and parameters of the zone

Here we will specify the information on heating and air conditioning devices, which are Table 2.

Table 2. Information of heating and air conditioning devices

Heating Information		
Heating Set Point	23 °C	The room temperature at which the heating device will stop working
Heating Air Temperature	33 °C	The temperature of the air coming out of the heating device
Cooling Information		
Cooling Set Point	23 °C	The room temperature at which the air conditioner will stop working
Cooling Air Temperature	16 °C	The temperature of the air coming out of the air conditioner

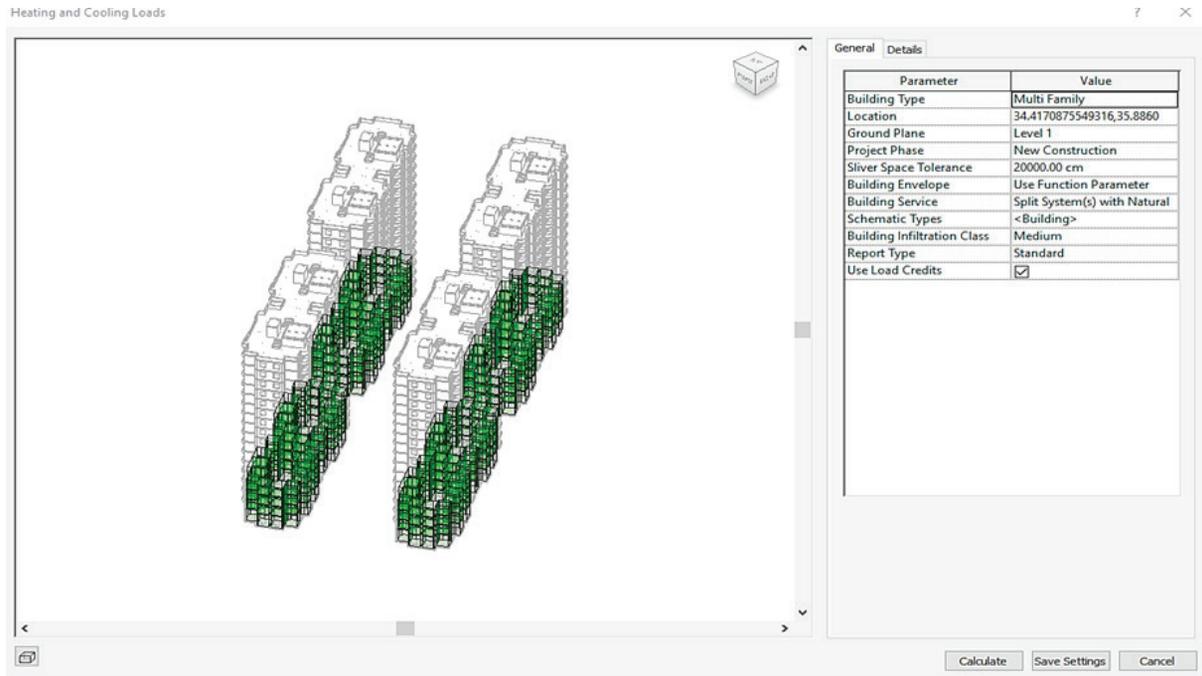


Fig. 12. Continuous assembly in real mode

Results of the loads for the continuous assembly method of buildings

Continuous assembly with East-West axis

The loads of each method of assembling buildings were studied in three orientation positions, the first in the real current situation (Fig. 12), the second when rotating at an angle of 5 degrees, and the third when rotating at an angle of 10 degrees, and we will compare the results with each other to reach the best orientation.

After calculating the load in the previous real situation, these buildings were rotated by 5 degrees (the second case) (Fig. 13) and 10 degrees (the third case) (Fig. 14) counterclockwise so that the longitudinal

axis (east-west) and this in turn will increase the area of the facades exposed to sunlight [16].

We note that the air conditioning loads of the ground floors decreased when directing the buildings at an angle of 5 degrees counterclockwise, where the availability in the load reached (26.8 kW), while when steering by 10 degrees, the availability reached (15 kW) and the third block in which the loads increased significantly as a result of the exposure of the bulk of its outer cover to sunlight (Fig. 15).

We note that the heating loads of the ground floors decreased when directing the buildings at an angle of 5 degrees counterclockwise, where the savings

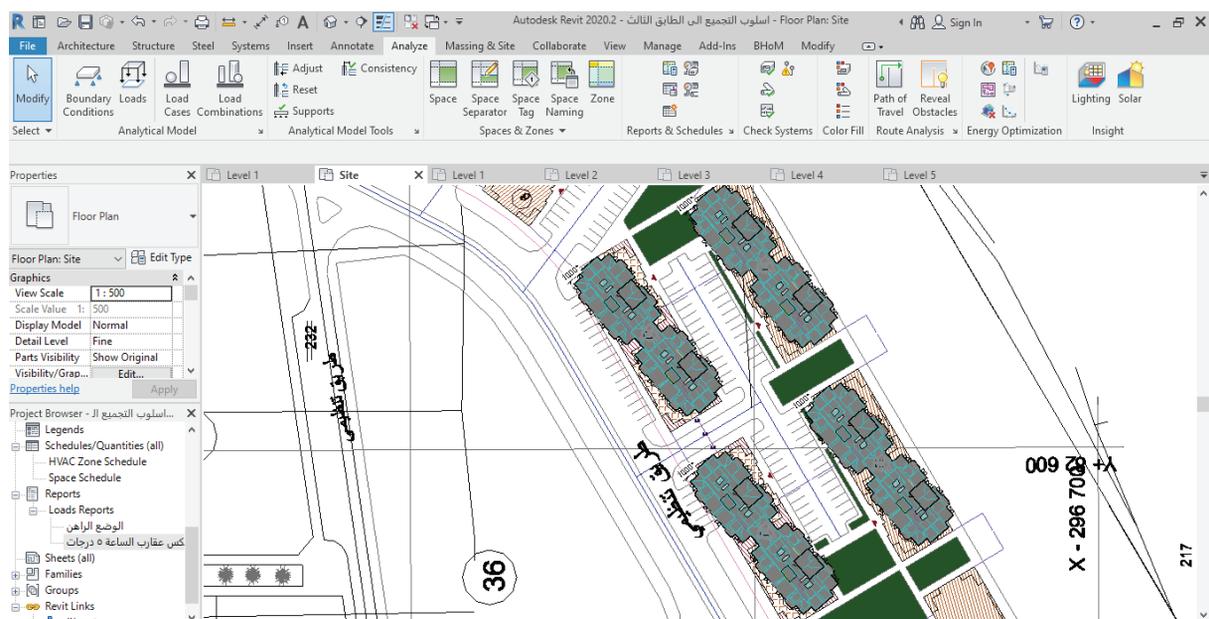


Fig. 13. Continuous assembly after steering 5 degrees counterclockwise



Fig. 14. Continuous assembly after steering 10 degrees counterclockwise

in load reached (49.73 kW), while when steering by 10 degrees, the savings reached (46.36 kW) (Fig. 16).

The savings in the total heat load when directing the four buildings by 5 degrees counterclockwise (778.41 kW) and compared with the availability resulting from directing the buildings 10 degrees counterclockwise, which amounted to (957.85 kW) (Fig. 17) with attention to the difference in savings on each floor of the building and the reason for this difference is due to the effect of height as a result of changing the intensity of radiation falling on the building with the change in height (Fig. 18, 19) where this was concluded by calculating the intensity of radiation falling on the building using the Insight programme, which is an addition to the Revit programme.

Continuous assembly with a north-south axis

The loads were studied in three orientation modes: the first in the real current situation (Fig. 20, a), the second when rotating 5 degrees clockwise (Fig. 20, b), and the third when rotating 10 degrees clockwise (Fig. 20, c) and we will compare the results with each other to reach the best orientation.

The percentage of savings in the total heat load when directing the four buildings by 5 degrees clockwise (16.4 %) and compared with the percentage of savings resulting from directing buildings 10 degrees with the clock, which amounted to (20.2 %) The reason for this is that the rotation will allow an increase in the solar radiation falling on the southern facades so that the long axis of each block becomes east-west

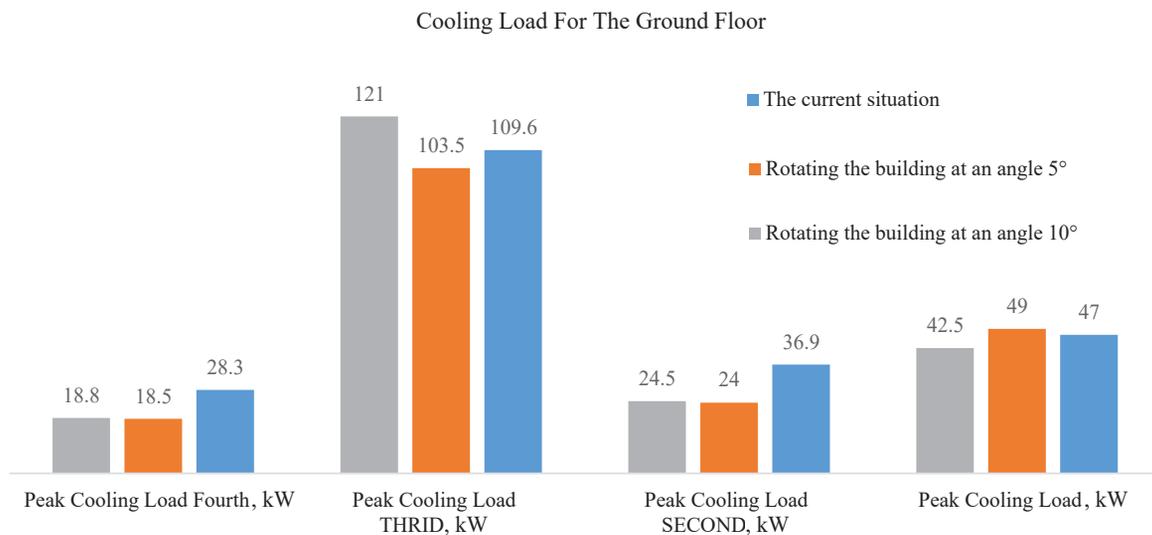


Fig. 15. Cooling load of ground floors in each block with three steering positions

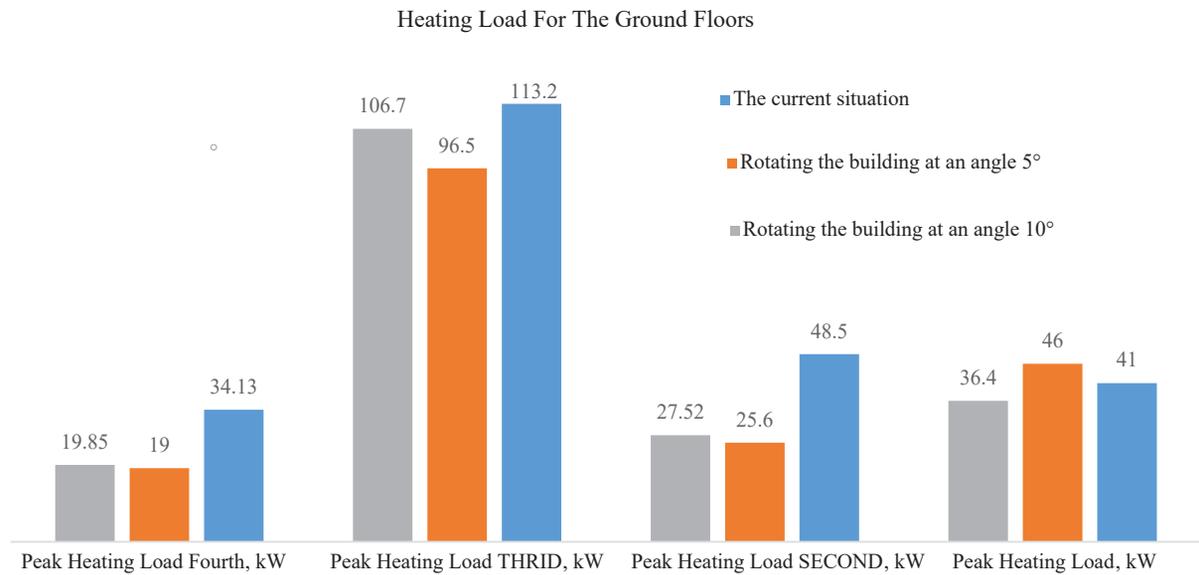


Fig. 16. Heating load of ground floors in each block with three steering positions

direction. Below is a table showing the heat load for each floor in the four blocks in the three positions (Table 3).

Proposing an additional tool by Dynamo to achieve the building envelope to the design requirements of the Syrian thermal insulation code

The study of thermal loads by the Revit indicated that the heat load in all types of distribution of partitions is directly affected by the outer shell

of the building from external walls, floors, ceilings, windows and even the glass used in it, where The building envelope can save energy and adapt to the surroundings and the external environment in order to provide internal comfort [17] and the table shows the components of the heat load for heating and adaptation and the contribution of each element to this load (Table 4).

We note from the previous two figures (Fig. 21, 22) that the ceilings contribute about 50 % of the air

Table 3. Total heat load per floor in the four blocks in kW

Floor	The current situation	Rotating the building at an angle 5°	Rotating the building at an angle 10°	Percentage of savings in the first case	Second case saving percentage
Ground floor	429.87	386.76	365.16	10.03	15.05
First floor	380.96	290.4	269.9	23.77	29.15
Second floor	328.3	230.92	221.6	29.66	32.50
Third floor	305.06	231.5	211.15	24.11	30.78
Fourth floor	354.86	299.38	292.75	15.63	17.50
Fifth floor	463.35	409.69	394.68	11.58	14.82
Sixth floor	460.3	408.46	385.07	11.26	16.34
Seventh floor	345.66	295.64	263.87	14.47	23.66
Eighth floor	465.7	417.5	405	10.35	13.03
Ninth floor	436	372.3	358.5	14.61	17.78
Tenth floor	388.67	321.77	296.97	17.21	23.59
Eleventh floor	341.34	290.54	257.64	14.88	24.52
Twelfth floor	366.8	291.9	300.8	20.42	17.99
Thirteenth floor	392.26	325.46	325.46	17.03	17.03
Fourteenth floor	440.65	381.95	373.05	13.32	15.34
Fifteenth floor	551.51	491.32	433.03	10.91	21.48
Sixteenth floor	451.81	325.81	352.55	27.89	21.97
Total	6,903.1	5,771.3	5,507.18	16.4	20.2

Comparison of loads with building orientation change



Fig. 17. Resulting savings per floor in the four blocks

Table 4. Components of convection with the contribution of building elements

Components	Cooling		Heating	
	Loads, W	Percentage of total, %	Loads, W	Percentage of total, %
Wall	13,018	20.65	34,955	48.70
Window	752	1.19	1,066	1.49
Door	751	1.19	1,812	2.53
Roof	31,438	49.88	15,820	22.04
Skylight	0	0.00	0	0.00
Partition	0	0.00	0	0.00
Infiltration	7,910	12.55	10,003	13.94
Ventilation	3,430	5.44	3,880	5.41
Lighting	2,054	3.26	-2,054	-2.86
Power	1,001	1.59	-1,001	-1.40
People	1,179	1.87	-1,179	-1.64
Plenum	0	0.00	0	0.00
Fan Heat	1,491	2.37	0	0.00

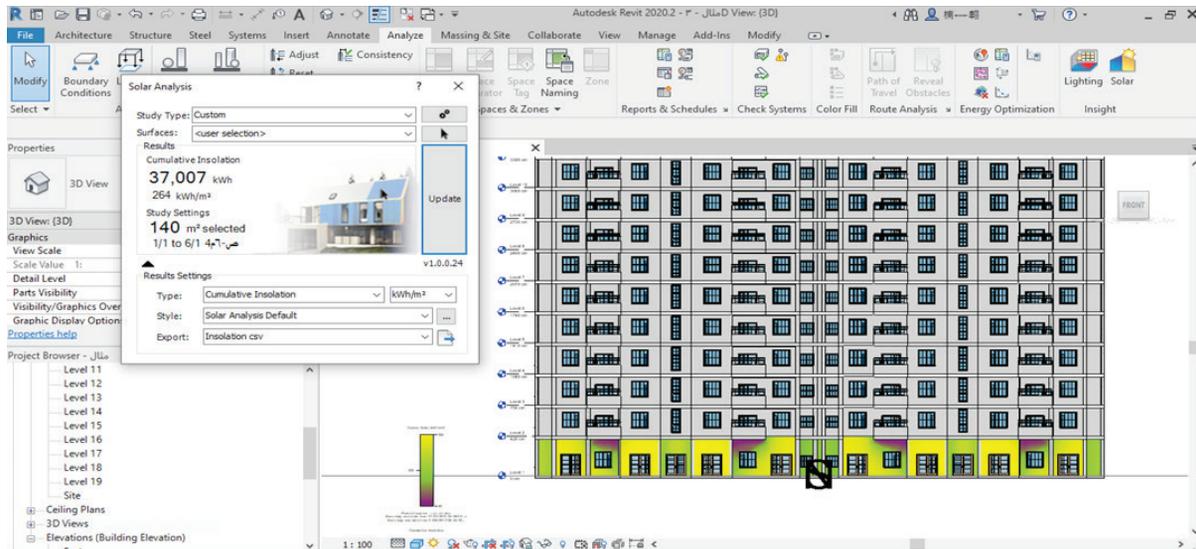


Fig. 18. A study of the solar radiation falling on the ground floor using Insight in Revit

conditioning loads and 22 % of the heating load, while the walls contribute about 50 % of the heating loads and 20 % of the air conditioning loads, and returning to the reason for this rise, we note that these elements are more interactive with the external environment as a result of the occurrence of heat exchange between the internal environment of the building with the heat of the air. As the total heat transfer coefficient of these elements is large and the value of the total heat transfer coefficient for building elements depends on several factors, including the properties of the material or materials that make up the elements, their thicknesses and the degree of exposure of their external surfaces to weather factors, and with the increase in the value

of the total heat transfer coefficient for building elements, the amount of heat lost in winter and gained in summer increases. Thus, an increase in energy consumption necessary to heat and air conditioning and thermal insulation is one of the best long-term means to ensure energy savings, reduce utility bills and improve the indoor air quality of the building [18, 19]. The building Revit programme helps to calculate the values of the total thermal transfer coefficient for the elements of the building, once the materials are introduced with their thickness, the programme gives both the values of thermal resistance and the total transition coefficient of the modeled element and the following are the values of the thermal coefficients extracted

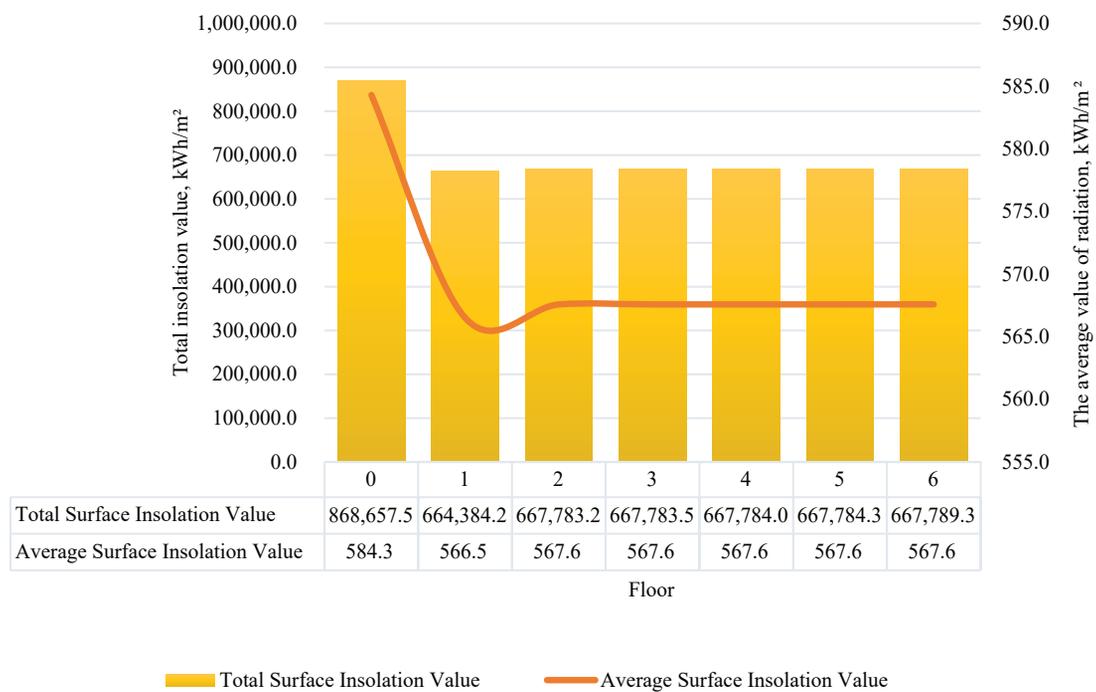
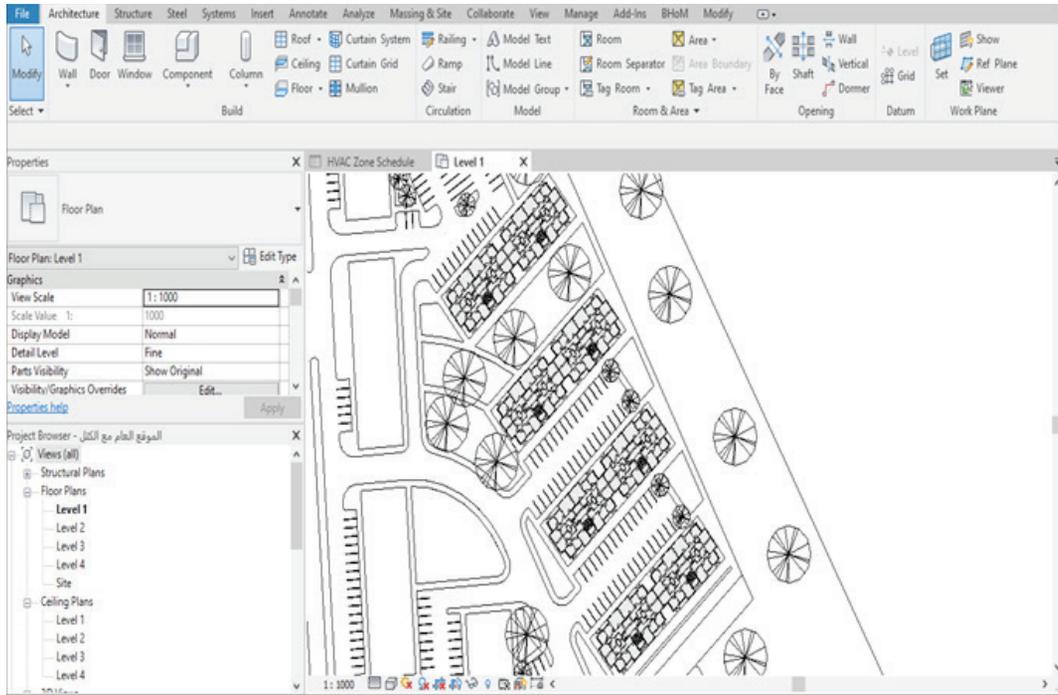
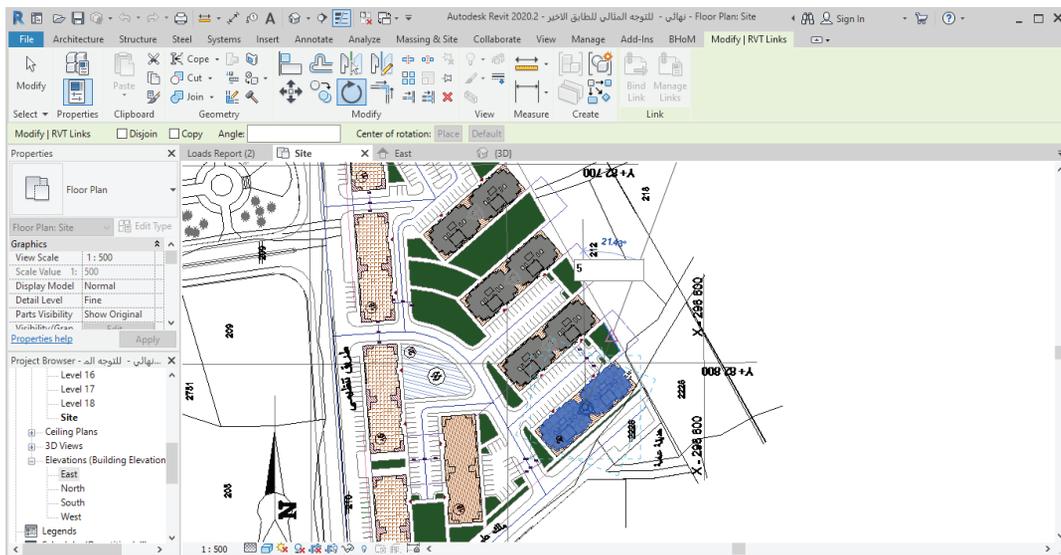


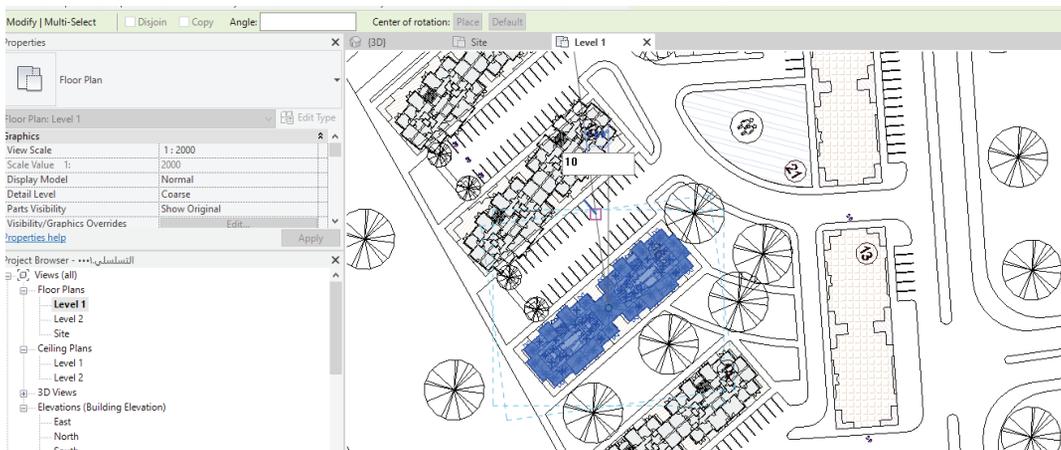
Fig. 19. The value of solar radiation on the first block of each floor



a



b



c

Fig. 20. North-South axis continuous assembly method

from the programme for the elements of the building (Fig. 23, 24).

The building elements must be designed so that the value of the total heat transfer coefficient is within the permissible limits according to the Syrian Arab code for insulation, and according to this code, the value of the total heat transfer coefficient for each building element must not exceed the values mentioned in Table 5.

The values of the total thermal transfer coefficient of the elements of the building envelope do not achieve the code, so an additional software tool was designed by Dynamo and the Python language (Fig. 25) to achieve the building envelope to the design requirements of the Syrian thermal insulation code in order to reach sustainable energy-saving buildings that benefit from sunlight and reduce fossil energy consumption.

Table 5. Maximum allowable values of the total heat transfer coefficient of building elements

Maximum total heat transfer coefficient, W/m ² ·K		Structural element
0.5	U_{roof}	The last ceiling
0.8	U_{ow}	Exterior walls without openings
5.2	U_{win}	Glass openings when they are:
		$A_{win} \leq 0.2 A_{facade}$
3.5	U_{win}	Glass openings when they are:
1.5	U_{facade}	$A_{win} > 0.2 A_{facade}$
1	U_G	Exterior facades include all openings
1	U_F	Floors adjacent to the soil
1	U_F	Floors between floors
0.5	U_F	Exposed flooring
A _{win} : Window & Door Space		A _{facade} : Facade space

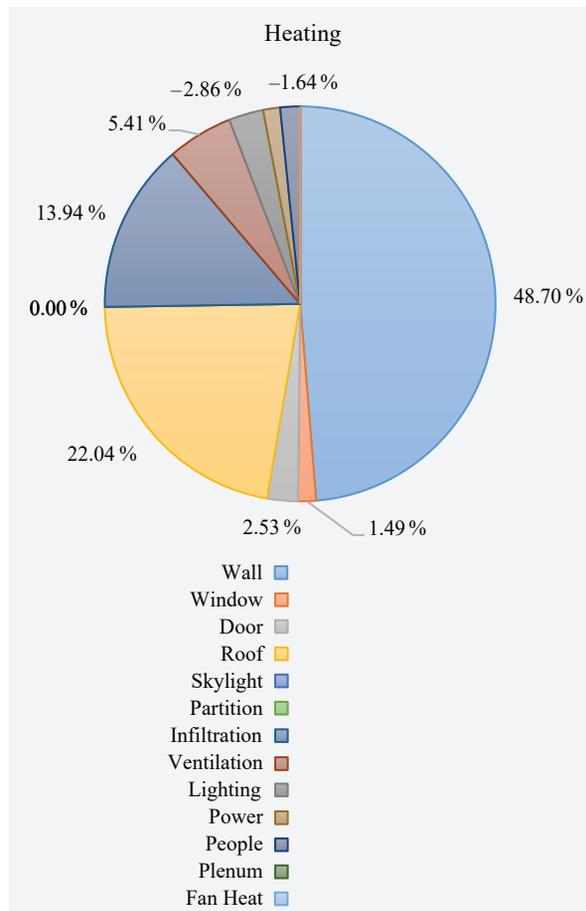


Fig. 21. Contribution of building elements to heating loads

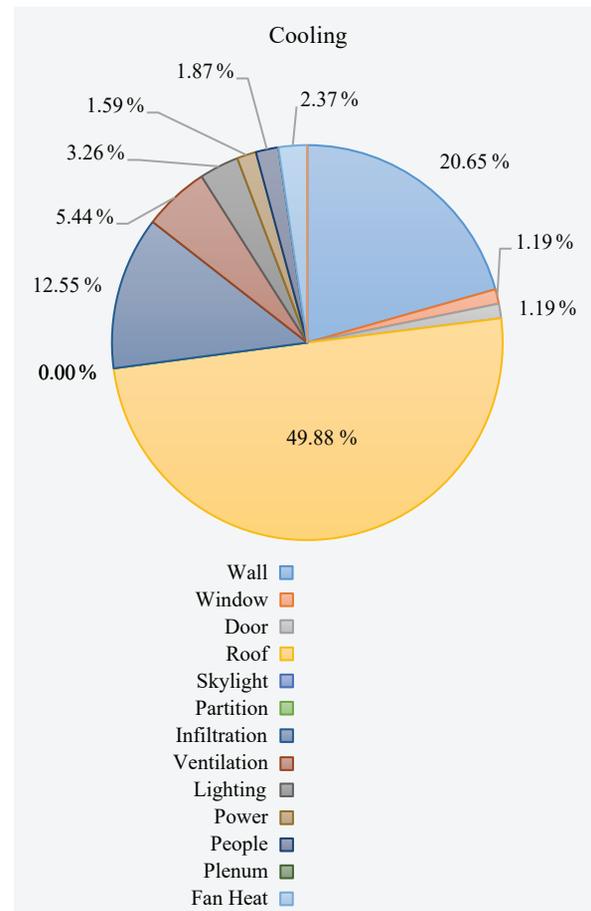


Fig. 22. Contribution of building elements to air conditioning loads

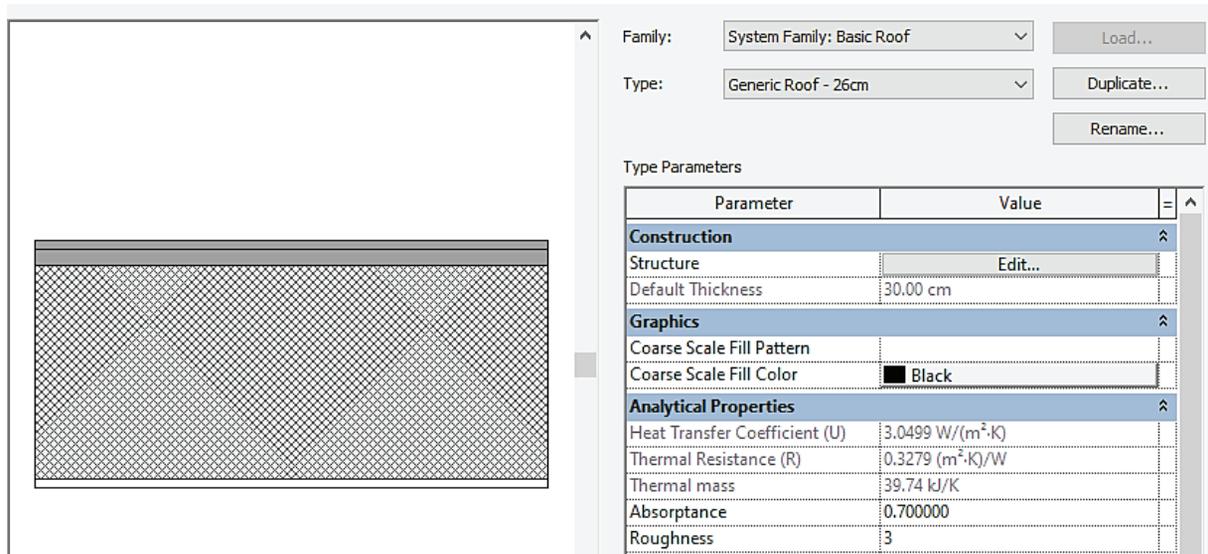


Fig. 23. Thermal properties of roofs extracted from Revit

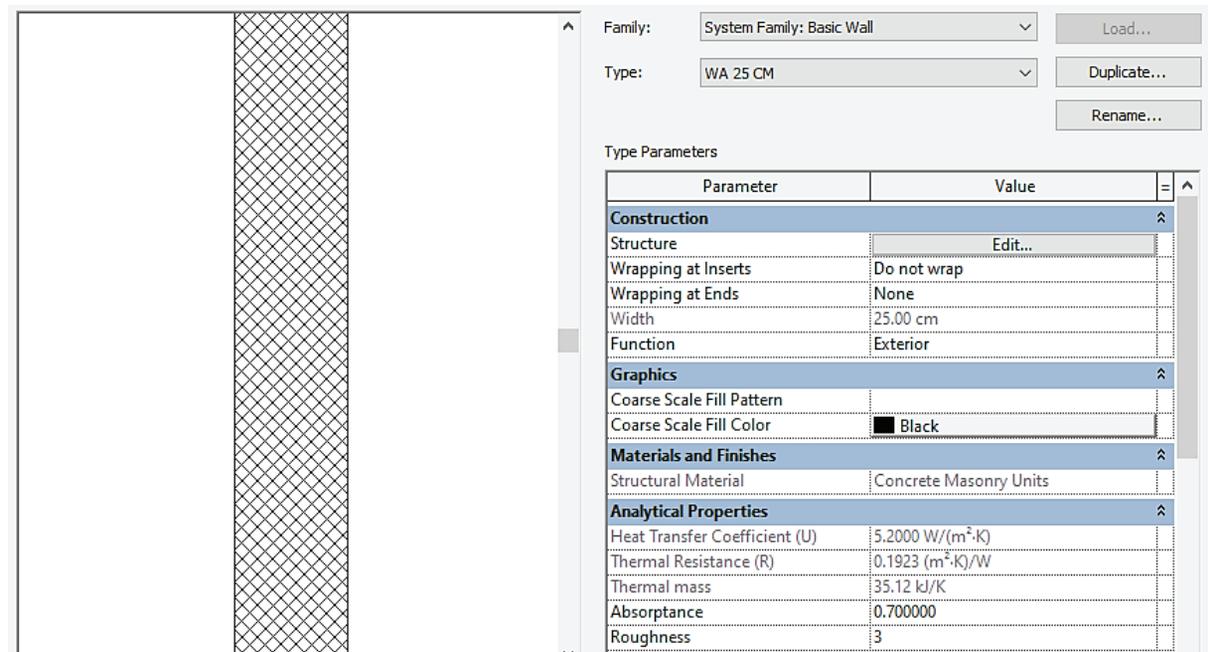


Fig. 24. Thermal properties of walls extracted from Revit

This tool first imports the elements of the outer shell of the studied building, which are (walls and floors adjacent to the soil, ceilings and floors between floors and windows) and then the thermal information integrated inside these elements, which is the total thermal transfer coefficient, thermal resistance and structural composition, is obtained in order to compare the transition coefficient resulting from modelling with what is allowed within the code and stipulated in (Table 5) using the Python language. If the results of the investigation node for the elements are not realized, the programme will add a new material (polystyrene) that increases

thermal resistance [20] and decreases the total transition coefficient by a specific thickness that can be changed, and the following is (Fig. 26) showing the mechanism of work of the node to introduce a new material to the building elements using the Python language.

The aim is to reach the elements of a building that meet one of the most important design requirements of the thermal insulation code, and after adding the new material, we notice a decrease in the thermal transfer coefficients so that they become within the acceptable limits stipulated in the code (Fig. 27, 28).

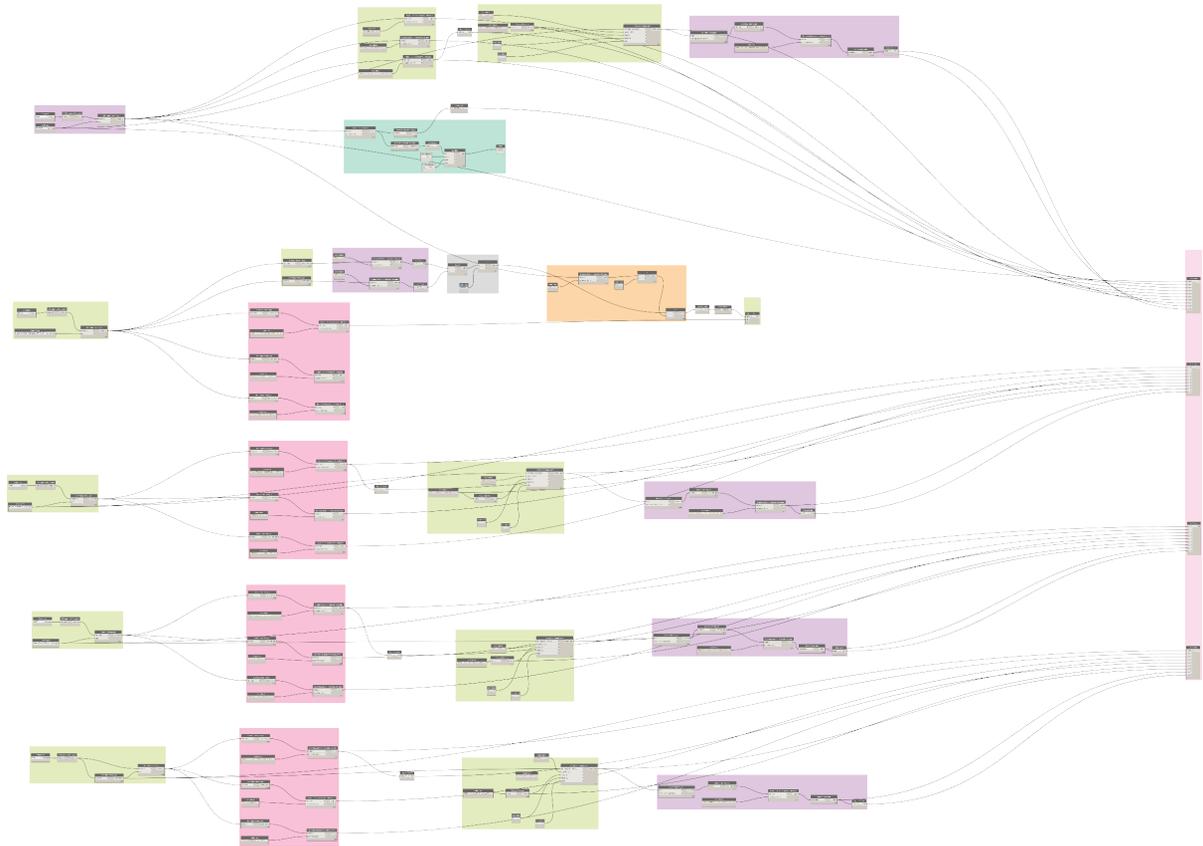


Fig. 25. Components of Dynamo nodes

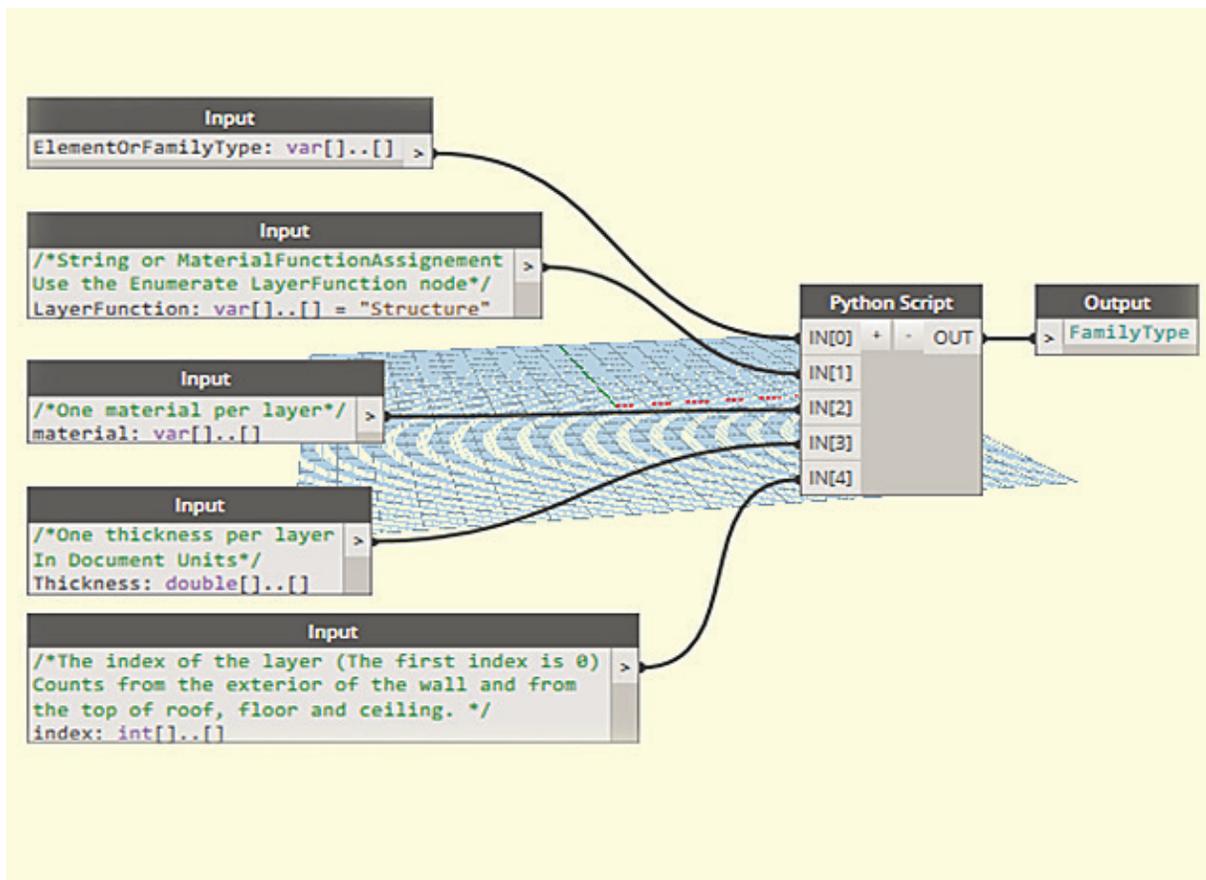


Fig. 26. Contract for introducing new material using Python

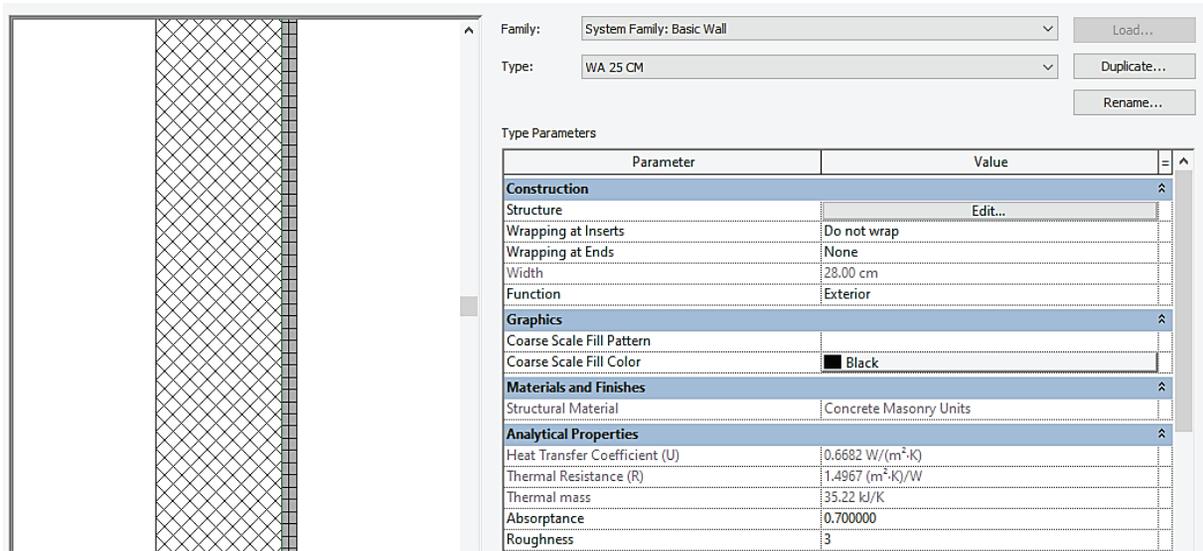


Fig. 27. Thermal properties of the walls of the building after adding the new material

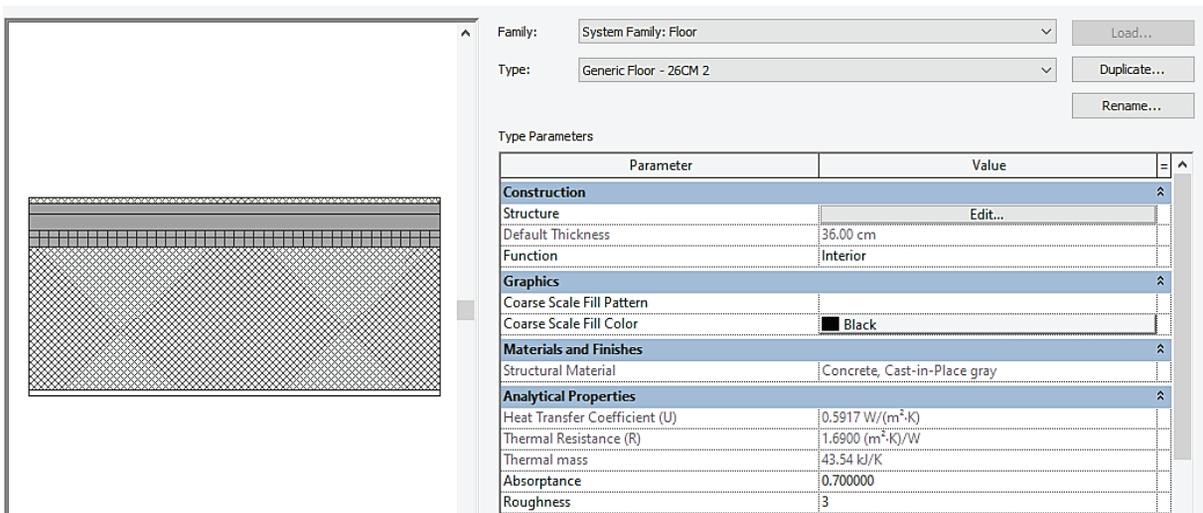


Fig. 28. Thermal properties of the floor of the building after adding the new material

CONCLUSION

The BIM methodology is an effective technology in the field of energy management in projects, which has many advantages that contribute to reducing annual energy consumption and reaching environmentally friendly buildings, and we conclude from this the following:

Building Information Modelling (BIM) contributes to predicting the amount of energy consumed annually and spent on heating and air conditioning through the tools that it provides easily and quickly, as building information is integrated into the building elements from heat transfer coefficient, thermal resistance, thermal mass and even climatic information of the site. They are taken from the nearest weather observatory without having to be collected or predicted by the site.

Studying the orientation of the building during the design stage contributes to reducing the total annual

heat load by more than 20 %, and this percentage varies according to the method of assembling the partitions, as the orientation of the buildings in the continuous quadrilateral assembly method achieved a percentage of savings in consumption exceeding 24 %, while in the alternating assembly method it reached Savings 10 %.

Using the Shadow Study tool designed with the help of Dynamo within the work environment of the Revit contributed significantly to the study of the distribution of residential partitions in terms of the extent of benefit from natural solar radiation, which is a source of renewable energy, as the research indicated that the longitudinal axis of the method of distributing buildings towards east — west, when the building is in a rectangular shape because this allows the southern facades to benefit from sunlight.

The new addition, using the visual programming language, meets the design requirements of the building envelope from the Syrian thermal insulation code, as it

contributed to reducing the thermal leakage resulting from the interaction of the outer shell of the building with the atmosphere, by returning the heat transfer

coefficient of these elements from rejected values to acceptable values. Thus reducing the annual total convection.

REFERENCES

1. Malkov I.I. *Energy saving in housing construction : passive and smart home*. Gomel, BelsUT, 2012; 18. (rus.).
2. Khudhaire H.Y., Naji H.I. Management of Abandoned Construction Projects in Iraq Using BIM Technology. *International Journal of Engineering*. 2021; 34(3). DOI: 10.5829/ije.2021.34.03c.08
3. Omran J. How to achieve sustainable building design and operation with building information modeling. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies*. 2020; 42(2):217-232.
4. Jalaei F., Jrade A. Integrating BIM with Green Building Certification System, Energy Analysis, and Cost Estimating Tools to Conceptually Design Sustainable Buildings. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. 2014; 19:140-149. DOI: 10.1061/9780784413517.015
5. Egwunatum S., Joseph-Akwara E., Akaigwe R. Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM). *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2016; 24(3):19-28. DOI: 10.1515/sjce-2016-0013
6. Golovanova L.A. Basics of project management of investments in improving energy efficiency of buildings. *Bulletin of Pacific State University*. 2017; 4(47):193-202. EDN YPJGOZ. (rus.).
7. Watfa M.K., Hawash A.E., Jaafar K. Using building information & energy modelling for energy efficient designs. *Journal of Information Technology in Construction*. 2021; 26:427-440. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.023
8. Egwunatum S., Joseph-Akwara E., Akaigwe R. Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM). *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2016; 24(3):19-28. DOI: 10.1515/sjce-2016-0013
9. Alsaud Y.A. *Analyze the performance of sustainable buildings using BIM software — evaluating simulation accuracy*. Elias Acetic AAA Canaanite, 2019.
10. Geekiyana D., Ramachandra T. A correlation analysis of factors influencing cooling energy demand of condominiums in Sri Lanka. *National Energy Symposium 2017*. 2017.
11. Ayyad T.M. *The impact of building orientation, opening to wall ratio, aspect ratio and envelope materials on buildings energy consumption in the tropics*. The British University in Dubai (BUiD), 2011.
12. Jannat N., Hussien A., Abdullah B., Cotgrave A. A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics. *Sustainability*. 2020; 12(12):4892. DOI: 10.3390/su12124892
13. Mengana S., Mousiadis T. *Parametric BIM: Energy performance analysis using Dynamo for Revit*. 2016.
14. Thabet W., Lucas J., Srinivasan S. Linking life cycle BIM data to a facility management system using Revit Dynamo. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*. 2022; 14(1):2539-2558. DOI: 10.2478/otmcj-2022-0001
15. Prasad K., Anchan S.S., Shambavi Kamath M., Akella V. Impact of building orientation on energy consumption in the design of green building. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*. 2017; 6(2):8-11.
16. Ashour H. *The environmental role of urban system (separate residences) in residential neighborhoods. Aleppo as a case study*. Aleppo University Faculty of Architecture, 2014.
17. Ibrahim N.A., Elsayed E., Saleh O.M. Towards a contemporary formulation of smart envelopes in the local environment. *Engineering Research Journal — Faculty of Engineering (Shoubra)*. 2022; 51(3):191-206. DOI: 10.21608/ERJSH.2022.252297
18. Divin N.V. BIM by using Revit API and dynamo : a review. *AlfaBuild*. 2020; 2(14):1404. DOI: 10.34910/ALF.14.4.EDNCGPPSX.
19. Mishra S., Usmani J., Varshney S. Energy saving analysis in building walls through thermal insulation system. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012; 2(5):128-135.
20. Cai S., Zhang B., Cremaschi L. Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications. *Building and Environment*. 2017; 123:50-65. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.06.034

Received March 27, 2023.

Adopted in revised form on January 19, 2024.

Approved for publication on January 19, 2024.

BIONOTES: **Jamal Younis Omran** — PhD in Construction Project Management Engineering, Professor, Dean of Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Lattakia, Syria; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.sy;

Moustafa Ali Wassouf — civil engineer Department of Construction Management, engineer, graduate student with master's degree at the Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Lattakia, Syria; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

Contribution of the authors:

Jamal Eunice Omran — scientific guidance, concept of research and development of methodology, text review, final conclusions.

Moustafa Ali Wassouf — participate in the development and implementation of curricula, develop and implement a software tool, write code in (python.)

The authors declare that there is no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малков И.И. Энергосбережение в жилищном строительстве. Пассивный и умный дом : учебно-методическое пособие. Гомель : БелГУТ, 2012. 18 с.
2. Khudhaire H.Y., Naji H.I. Management of Abandoned Construction Projects in Iraq Using BIM Technology // International Journal of Engineering. 2021. Vol. 34. Issue 3. DOI: 10.5829/ije.2021.34.03c.08
3. Omran J. How to achieve sustainable building design and operation with building information modeling // Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies. 2020. Vol. 42. Issue 2. Pp. 217–232.
4. Jalaei F., Jrade A. Integrating BIM with Green Building Certification System, Energy Analysis, and Cost Estimating Tools to Conceptually Design Sustainable Buildings // Electronic Journal of Information Technology in Construction. 2014. Vol. 19. Pp. 140–149. DOI: 10.1061/9780784413517.015
5. Egwunatum S., Joseph-Akwara E., Akaigwe R. Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM) // Slovak Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 24. Issue 3. Pp. 19–28. DOI: 10.1515/sjce-2016-0013
6. Голованова Л.А. Основы проектного управления инвестициями в повышении энергоэффективности зданий // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2017. № 4 (47). С. 193–202. EDN YPJGOZ.
7. Watfa M.K., Hawash A.E., Jaafar K. Using building information & energy modelling for energy efficient designs // Journal of Information Technology in Construction. 2021. Vol. 26. Pp. 427–440. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.023
8. Egwunatum S., Joseph-Akwara E., Akaigwe R. Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM) // Slovak Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 24. Issue 3. Pp. 19–28. DOI: 10.1515/sjce-2016-0013
9. Alsaud Y.A. Analyze the performance of sustainable buildings using BIM software — Evaluating Simulation Accuracy. Elias Acetic AAA Canaanite, 2019.
10. Geekiyana D., Ramachandra T. A correlation analysis of factors influencing cooling energy demand of condominiums in Sri Lanka // National Energy Symposium 2017. 2017.
11. Ayyad T.M. The impact of building orientation, opening to wall ratio, aspect ratio and envelope materials on buildings energy consumption in the tropics. The British University in Dubai (BUiD), 2011.
12. Jannat N., Hussien A., Abdullah B., Cotgrave A. A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 12. P. 4892. DOI: 10.3390/su12124892
13. Mengana S., Mousiadis T. Parametric BIM: Energy performance analysis using Dynamo for Revit. 2016.
14. Thabet W., Lucas J., Srinivasan S. Linking life cycle BIM data to a facility management system using Revit Dynamo // Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal. 2022. Vol. 14. Issue 1. Pp. 2539–2558. DOI: 10.2478/otmcj-2022-0001
15. Prasad K., Anchan S.S., Shambavi Kamath M., Akella V. Impact of building orientation on energy consumption in the design of green building // International Journal of Emerging Research in Management & Technology. 2017. Vol. 6. Issue 2. Pp. 8–11.
16. Ashour H. The environmental role of urban system (separate residences) in residential neighborhoods. Aleppo as a case study. Aleppo University Faculty of Architecture, 2014.
17. Ibrahim N.A., Elsayed E., Saleh O.M. Towards a contemporary formulation of smart envelopes in the local environment // Engineering Research Journal — Faculty of Engineering (Shoubra). 2022. Vol. 51. Issue 3. Pp. 191–206. DOI: 10.21608/ERJSH.2022.252297
18. Divin N.V. BIM by using Revit API and dynamo : a review // AlfaBuild. 2020. No. 2 (14). P. 1404. DOI: 10.34910/ALF.14.4.EDNCGPPSX.
19. Mishra S., Usmani J., Varshney S. Energy saving analysis in building walls through thermal insulation system // International Journal of Engineering Research and Applications. 2012. Vol. 2. Issue 5. Pp. 128–135.
20. Cai S., Zhang B., Cremaschi L. Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications // Building and Environment. 2017. Vol. 123. Pp. 50–65. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.06.034

Поступила в редакцию 27 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2024 г.

Одобрена для публикации 19 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Джамал Юнис Омран** — доктор наук в области инженерии управления строительными проектами, профессор, декан факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.sy;

Мустафа Али Вассуф — инженер-строитель кафедры управления строительством, инженер, аспирант со степенью магистра факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

Вклад авторов:

Джамал Юнис Омран — научное руководство, концепция исследования и разработки методологии, обзор текста, выводы.

Мустафа Али Вассуф — участие в разработке и внедрении учебных программ, разработка и внедрение программного инструмента, написание кода на Python.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха

Валерий Николаевич Азаров, Олег Васильевич Бурлаченко,
Александр Олегович Бурлаченко, Мария Денисовна Азарова

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие подходы к принятию управленческих решений в строительном производстве позволяют выбирать варианты лишь для определенного этапа жизненного цикла объекта капитального строительства (ЖЦ ОКС) без учета их эффективности на протяжении всего ЖЦ. Для устранения этого недостатка предлагается система информационного обеспечения управления ЖЦ ОКС с учетом минимизации пылевого загрязнения атмосферного воздуха при реализации принятых решений.

Материалы и методы. В рамках системного подхода к управлению ЖЦ ОКС важнейшее значение имеет правильный выбор критериев, с использованием которых может быть принято оптимальное решение. Необходимость обеспечения эффективности управленческих решений на протяжении ЖЦ ОКС предполагает разработку системы, позволяющей уже на начальных этапах прогнозировать поведение управляемого объекта. Поскольку наступление различных событий (ситуаций) в процессе ЖЦ ОКС носит случайный характер, большое значение имеет определение вероятности наступления тех или иных событий. Представлены технические средства для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха пылевыми частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} .

Результаты. Для учета иных критериев принятия решений, помимо технико-экономических показателей, предложены полученные экспериментальным путем значения концентрации пыли в атмосферном воздухе. С этой целью систематизированы источники такого загрязнения на всех этапах ЖЦ ОКС. На основе построенной модели ЖЦ получены выражения для определения вероятности наступления событий на протяжении ЖЦ ОКС. Данная стохастическая модель дает возможность прогнозировать состояние объекта управления при реализации того или иного решения.

Выводы. Построена система информационного обеспечения, позволяющая, в отличие от применяемых методик, принимать решения по управлению ЖЦ ОКС не только с учетом технико-экономической эффективности сравниваемых вариантов, но и степени пылевого загрязнения атмосферного воздуха. С помощью разработанного информационного обеспечения можно учитывать случайный характер наступления тех или иных событий в течение ЖЦ ОКС с установлением вероятности их наступления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление жизненным циклом, пылевое загрязнение, мелкодисперсная пыль, объект капитального строительства, критерии выбора, измерители концентрации пыли, эффективность управленческих решений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Азарова М.Д. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 456–468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468

Автор, ответственный за переписку: Олег Васильевич Бурлаченко, oburlachenko@yandex.ru.

Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution

Valerii N. Azarov, Oleg V. Burlachenko, Alexander O. Burlachenko,
Maria D. Azarova

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The existing approaches to management decision-making in construction production give the opportunity to select options only for a certain stage of the capital construction object life cycle (LC CCO), not considering their effectiveness throughout the whole LC. To eliminate this disadvantage, the authors propose a system of information support for the LC CCO management, taking into account the minimization of atmospheric air dust pollution during the implementation of decisions.

Materials and methods. Within the framework of a systematic approach to the LC CCO management, the correct criteria choice is of crucial importance, using which an optimal decision can be made. On the other hand, the need to ensure the effectiveness of managerial decisions throughout the LC CCO involves the development of a system that allows to predict

the managed object behavior throughout its entire life cycle already in the initial stages. Since the occurrence of various events (situations) during the LC CCO is random, the determination of the probability of occurrence of these or those events is of great importance. Technical means for monitoring atmospheric air pollution by dust particles $PM_{2.5}$ and PM_{10} are presented.

Results. To take into account other decision-making criteria, besides technical and economic indicators, the experimentally obtained reduced values of dust concentration in atmospheric air are proposed. For this purpose, the sources of such pollution in all the LC CCO stages are systematized. Based on the developed life cycle model, expressions for determining the probability of events occurrence during the LC CCO are obtained. This stochastic model allows you to predict the state of the control object when implementing a particular solution.

The application of the proposed methodology made it possible to determine the fine dust concentration and the probability of exceeding the maximum permissible concentration in some types of work to calculate the effectiveness of the considered management decisions.

Conclusions. An information support system was built, which, unlike the applied methods, makes it possible to make decisions on the LC CCO management, not only taking into account the technical and economic efficiency of the compared options, but also the degree of atmospheric air dust pollution. In addition, the developed information support allows you to take into account the fact that certain events occurrence is random during the LC CCO with the determination of their occurrence probability.

KEYWORDS: life cycle management, dust pollution, fine dust, capital construction object, selection criteria, dust concentration meters, management decisions effectiveness

FOR CITATION: Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Azarova M.D. Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):456-468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468 (rus.).

Corresponding author: Oleg V. Burlachenko, oburlachenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В строительной сфере высокий уровень и качество управленческой деятельности является особенно сложной задачей, поскольку процесс управления представляет собой многозвенную, продолжающуюся десятки и сотни лет цепь не всегда последовательных событий, этапов жизненного цикла (ЖЦ), предполагающих необходимость сложных стохастических подходов к созданию методологии управления.

В этой связи важен правильный выбор критериев оптимизации, варьируя которые можно выработать наиболее эффективное управленческое решение.

Существующие подходы к принятию управленческих решений в строительном производстве позволяют производить выбор технологий, вариантов конструктивного исполнения, средств механизации и т.д. лишь для какого-либо определенного этапа ЖЦ объекта капитального строительства (ОКС), без учета их эффективности на всем его протяжении. Современные требования к качеству строительной продукции могут быть удовлетворены только при реализации системного подхода к инвестиционно-строительному процессу как к управлению ОКС на протяжении всего его ЖЦ. Существует ряд подходов к декомпозиции ЖЦ ОКС на этапы.

Так, уже в 2000-е годы нынешнего столетия были разработаны основы системного подхода к строительному производству в концепции комплекса взаимосвязей между участниками инвестиционно-строительного проекта с различными этапами его ЖЦ [1]. При этом декомпозиция ЖЦ на этапы включает в себя цепочку от вхождения в проект до эксплуатации объекта, но, например, этапы демонтажа и утилизации объекта в предлагаемой модели не рассматривались.

Следующим этапом в развитии системотехнических подходов к строительному производству стала концепция непрерывной информационной поддержки ЖЦ строительного объекта (СО), предложенная в работе [2]. Авторы устраняют «разрыв» в информационном обеспечении между различными этапами ЖЦ ОКС. При этом не исследуются критерии выбора управленческих решений на протяжении ЖЦ, а также не устанавливаются функциональные зависимости, выявляющие эффективность принятых решений на различных его этапах. Между тем введение в модель поддержки ЖЦ подобных управляемых факторов позволит принимать управленческое решение, реализация которого даст возможность получить оптимальный результат на всех этапах ЖЦ ОКС, а не только для отдельно взятого этапа (как правило, этапа строительства).

В публикации [3] изучается структура ЖЦ стационарного и мобильного СО. Выявлены функциональные связи этапов ЖЦ, предполагающие внесение корректировок при принятии управленческих решений. Для повышения эффективности и адекватности таких решений необходимо построение модели ЖЦ ОКС с возможностью определения вероятности наступления того или иного события, в котором в информационном поле может быть ОКС. В концепции информационного обеспечения управления (ИОУ) ЖЦ событиями будем называть этапы ЖЦ, а также состояния объекта, в которых он может находиться в каком-либо из этапов (например, реконструкция в этапе эксплуатации ОКС).

Такой подход рассмотрен в трудах [4–8]. Авторы предложили модель ЖЦ ОКС в виде графа переходов. Наступление событий (этапов ЖЦ СО) носит стохастический характер. Была представлена модель, позволяющая определять вероятность

наступления того или иного события (пробытия объекта управления в информационной среде в том или ином состоянии, этапе ЖЦ).

В данной статье авторы развивают модель ЖЦ ОКС с учетом минимизации загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью, выделяемой на протяжении различных его этапов.

Выбор в качестве одного из критериев при принятии решений по управлению ЖЦ ОКС обусловлен негативным влиянием пылевого воздействия на здоровье не только рабочих, выполняющих строительные и ремонтные работы, но и людей, проживающих в зданиях, работающих в помещениях на протяжении эксплуатации объекта, а также в течение всего ЖЦ.

Проанализированы негативное влияние пылевого загрязнения на здоровье человека (особенно мелкодисперсной пыли), а также зависимость концентрации PM_{10} и $PM_{2,5}$ (частиц менее 10 и 2,5 мкм соответственно) рядом с местами проведения различных работ от природно-климатических условий, видов работ, характеристик урбанизированных территорий [9–17]. Представляет интерес изучение вопросов оценки пылевого загрязнения атмосферного воздуха на протяжении всех этапов ЖЦ ОКС с целью интеграции этих данных в общую систему ИОУ им.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью формирования системы информационного обеспечения управления ЖЦ ОКС с условием минимизации пылевого загрязнения атмосферного

воздуха авторы провели анализ источников такого загрязнения с выявлением этапов ЖЦ (событий в информационной среде), наиболее негативно влияющих на здоровье человека и окружающую среду. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Табл. 1 позволяет выявить этапы ЖЦ (события), наиболее негативно влияющие на здоровье человека и окружающую среду. Проведены сбор и передача информации, а также расчет концентрации мелкодисперсной пыли в зонах выполнения работ, характерных для рассматриваемых событий по методике МРР-2017 с применением универсальной программы «Эколог», которая позволяет рассчитывать загрязнение атмосферного воздуха. Сформирована база данных в рамках информационного обеспечения принятия решений управления ЖЦ ОКС с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха. Разработано техническое решение снижения концентрации пыли в атмосферном воздухе для конкретных видов работ¹.

За основу системы информационного обеспечения авторами принята модернизированная модель ЖЦ ОКС. Предложена модель ЖЦ в виде графа переходов [4–6]. Прохождение объекта управления по этапам ЖЦ (наступление событий) носит

¹ Патент РФ № 2793668, МПК В08В 15/02. Аспирационная пылеулавливающая установка / Фоменко Н.А., Душко О.В., Бурлаченко О.В., Ахмедов А.М., Фоменко В.Н., Бурлаченко А.О. Волгоград : ВолгГТУ, 2023.

Табл. 1. Анализ источников загрязнения воздуха на различных этапах ЖЦ ОКС

Table 1. Analysis of air pollution sources at various LC CCO stages

Событие (этап ЖЦ) / Event (LC stage)	Источники пылевого загрязнения Dust pollution sources
Инженерные изыскания (предпроектная подготовка) Engineering research (pre-project preparation)	Проходка инженерно-геологических выработок, исследования физико-механических свойств грунтов, гидрогеологические исследования, геокриологические исследования, инженерно-геофизические исследования Engineering and geological workings sinking, studies of physical and mechanical soils properties, hydrogeological studies, geocryological studies, engineering and geophysical studies
Производство и транспортировка строительных материалов и изделий Construction materials and products production and transportation	Производство сыпучих материалов, мелкоштучных материалов и блоков, утеплителей, металлических конструкций, обработка древесины, доставка к месту строительства Bulk materials Production, small-piece materials and blocks, insulation, metal structures, wood processing, delivery to the construction site
Реализация проекта (строительство) Project implementation (construction)	Земляные, монтажные, отделочные, транспортные работы Earthworks, general construction, finishing, transportation
Эксплуатация CCO operation	Работы, выполняемые при капитальном ремонте, реконструкции, расширении, техническом перевооружении The complex of works on capital repairs, reconstruction, expansion, technical re-equipment
Демонтаж и утилизация Dismantling and utilization	Работы в рамках демонтажа, рекультивации участка, транспортировки, рециклинга Complex of works on dismantling, site recultivation, transportation, recycling

случайный характер, поэтому данный процесс рассматривается как Марковский с определенными вероятностями наступления событий. В настоящей работе, в отличие от перечисленных, декомпозиция ЖЦ на этапы основана на выявлении событий, связанных с наибольшим загрязнением атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью (рис. 1).

Из рис. 1 очевидно, что построенный граф переходов представляет собой замкнутую Марковскую цепь. Такой подход, базирующийся на применении аппарата исследования операций, позволяет описать ЖЦ объекта как восстанавливаемую систему.

Символом k обозначены порядковые номера наступления событий (этапов ЖЦ). Следует отметить, что авторы данной статьи принимают допущение о том, что в информационной среде понятия «событие» и «этап ЖЦ ОКС» эквивалентны, в то вре-

мя как в физическом смысле в течение одного этапа ЖЦ реального строительного объекта могут наступать различные события.

Согласно разработанной модели, движение объекта по ЖЦ, представленному в информационной среде, происходит следующим образом. После прохождения информационной модели ОКС концептуального этапа ЖЦ (анализ потребности) с вероятностью $p'_2(1) = 1$ наступает событие проведения инженерных изысканий в рамках предпроектной подготовки (т.е. второй этап ЖЦ). После этого объект попадает в этап проектирования с вероятностью $p'_3(2) = 1$. Вероятности попадания объекта в данные этапы равны 1, так как наступление этих событий носит безальтернативный характер. После этапа проектирования с вероятностью, равной 1, начинается реализация проекта. В связи со значимостью

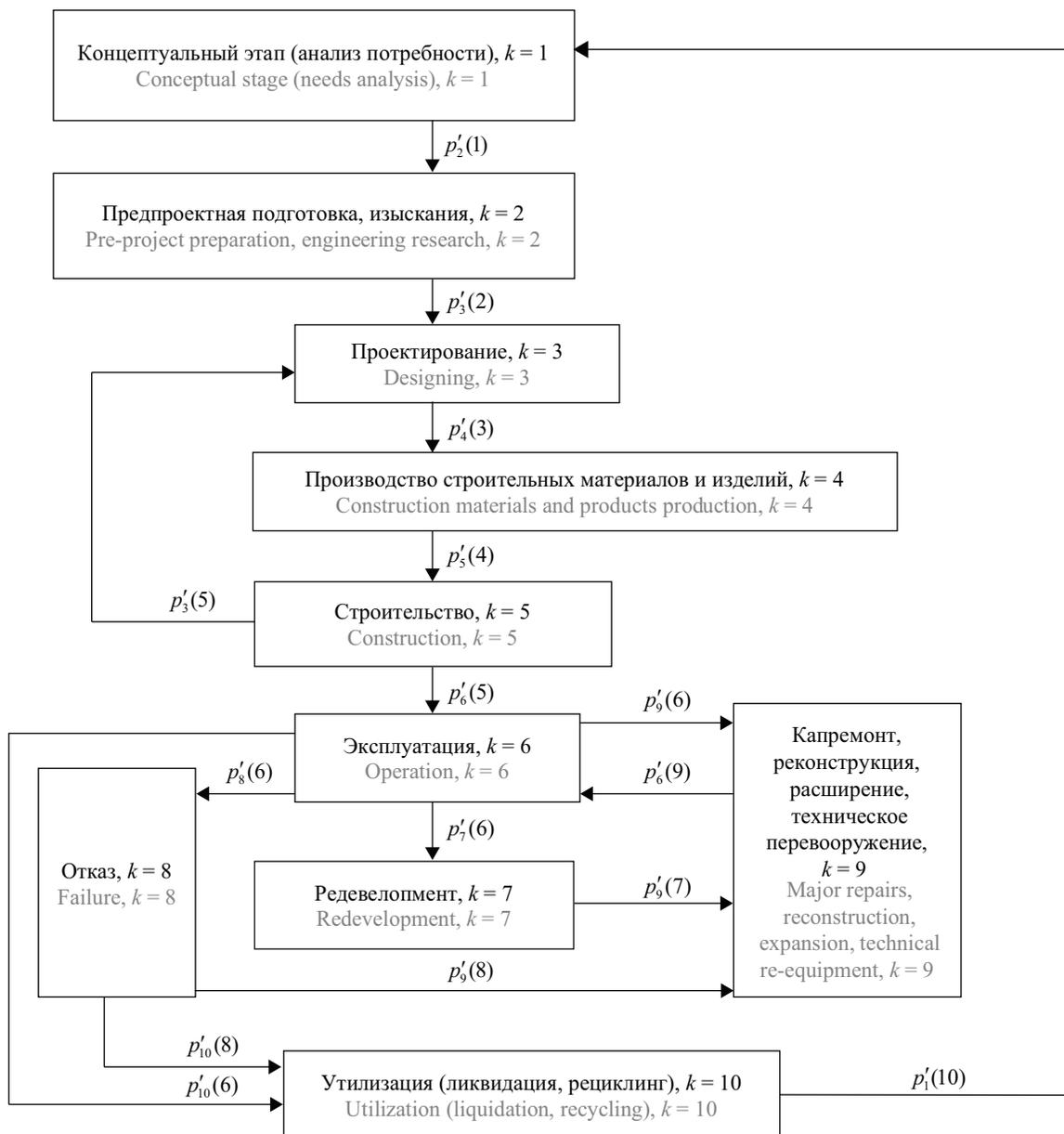


Рис. 1. Модель ЖЦ ОКС

Fig. 1. The LC CCO model

процесса производства строительных материалов, конструкций, полуфабрикатов и изделий с точки зрения пылевого загрязнения окружающей среды выделяем его как самостоятельное событие (этап ЖЦ), вероятность наступления которого $p'_4(3) = 1$. Вероятность наступления события начала строительномонтажных после этого $p'_5(4) = 1$.

Далее объект из этапа строительства переходит в этап эксплуатации. Вероятность этого события $p'_6(5)$. Однако, если при реализации проекта (т.е. строительстве) выявится недостаточная эффективность принятых на предыдущем этапе решений, необходим поиск альтернативного варианта с корректировкой принятых ранее технико-технологических решений. В этом случае объект в виртуальном смысле «вернется» в этап проектирования. Вероятность наступления этого события $p'_3(5) = 1 - p'_6(5)$.

На этапе эксплуатации возможно наступление четырех взаимоисключающих событий: возникновение отказа вследствие причин техногенного, природно-климатического характера и иных (с вероятностью $p'_8(6)$); принятие решения о редевелопменте объекта с изменением функционала ($p'_7(6)$), который с вероятностью $p'_9(7) = 1$ предполагает наступление события проведения реконструкции, технического перевооружения, расширения, капитального ремонта. Это же событие с вероятностью $p'_9(6)$ может наступить при нахождении объекта на этапе эксплуатации. Кроме того, объект по завершении этапа эксплуатации может с вероятностью $p'_{10}(6)$ перейти в этап утилизации.

После завершения мероприятий, выполняемых на этапе $k = 9$, объект возвращается в этап эксплуатации с вероятностью $p'_6(9) = 1$. В случае возникновения события отказа и принятия решения о невозможности дальнейшей эксплуатации объекта он с вероятностью $p'_{10}(8) = 1 - p'_9(8)$ переходит в этап утилизации.

Следует отметить, что в качестве объекта управления может выступать как инвестиционно-строительный процесс в целом, так и его отдельные элементы (в частности, здания, сооружения, развиваемые общественные пространства). По завершении этапа эксплуатации может приниматься решение как о ликвидации объекта, так и о продолжении эксплуатации какого-то из его элементов (например, возведение нового объекта на сохраняемом фундаменте). Также возможно принятие решения о реновации объекта. В последнем случае он подвергается преоб-

разованию в соответствии с требованиями, предъявляемыми к нему по обеспечению конкурентоспособности. Еще одна возможность продления физической жизни отдельных элементов объекта управления — повторное промышленное использование строительных отходов (рециклинг). Это возврат в промышленное производство материалов, которые содержатся в отходах строительства: металла, бетона, кирпича, древесины, стекла. Для принятия таких решений объект в информационном пространстве возвращается в концептуальный этап ЖЦ, что и предопределяет замкнутую структуру модели ЖЦ.

Поскольку, как было отмечено, граф на рис. 1 является конечной регулярной цепью Маркова, для определения вероятностей пребывания объекта на различных этапах ЖЦ (наступления событий) воспользуемся уравнениями Колмогорова². Такой подход позволяет установить вероятность наступления тех или иных событий в зависимости от принятого управленческого решения.

Вероятности наступления событий по рис. 1 — условные, поскольку зависят от вероятности наступления предшествующих событий. Для определения безусловных вероятностей наступления событий перехода объекта управления из одного этапа ЖЦ в другой построим матрицу инцидентности P_k на основе графа (рис. 1).

Построение данной матрицы основывается на следующем подходе. Все строки матрицы в отдельности описывают вероятность (причем условную) наступления того, что наступившее событие происходит из определенного предшествующего (т.е. попаданию на k -й этап ЖЦ предшествовал этап $k-1$). В этом случае строки показывают, какое событие было предшествующим для объекта, а столбцы — какое событие происходит на данный момент (на какой этап ЖЦ перешел объект). Соответственно 1-я строка матрицы содержит условные вероятности того, что управляемый объект перешел в текущее состояние из этапа утилизации, 2-я — из этапа ремонта, 3-я — отказа, 4-я — редевелопмента, 5-я — эксплуатации, 6-я — строительства, 7-я — производства строительных материалов и изделий, 8-я — проектирования, 9-я — предпроектной подготовки и изысканий, 10 — концептуального этапа.

На основании изложенного выше матрица инцидентности имеет вид:

$$\bar{P}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_9(8) & p_{10}(8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_7(6) & p_8(6) & p_9(6) & p_{10}(6) \\ 0 & 0 & p_3(5) & 0 & 0 & p_6(5) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

² Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей. УМН. 1938. № 5. С. 5–41.

Безусловные вероятности нахождения объекта на том или ином этапе ЖЦ на основе матрицы инцидентности определяем с применением методики³, адаптировав ее для нашей модели ЖЦ. В соответствии с принятой моделью k находится в интервале $[1-m]$, где $m = 10$ — количество этапов ЖЦ (событий).

Вероятность нахождения объекта в принятых этапах ЖЦ в этом случае определяется следующим образом:

$$P_1 = \frac{p'_1(10)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{p'_2(1)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{p'_3(2) + p'_3(5)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (4)$$

$$P_4 = \frac{p'_4(3)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (5)$$

$$P_5 = \frac{p'_5(4)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (6)$$

$$P_6 = \frac{p'_6(5) + p'_6(9)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (7)$$

$$P_7 = \frac{p'_7(6)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (8)$$

$$P_8 = \frac{p'_8(6)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (9)$$

$$P_9 = \frac{p'_9(6) + p'_9(7) + p'_9(8)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (10)$$

$$P_{10} = \frac{p'_{10}(6) + p'_{10}(8)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (11)$$

³ Бурлаченко О.В., Шулячкер В.М. Информационно-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств машин и оборудования на основе системы комплексных воздействий : монография. Волгоград : ВолгГАСУ, 2005. 266 с.

Для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха пылевыми частицами $PM_{2.5}$ и PM_{10} на территории строительных площадок, жилых зон и других районов города использовали бюджетные измерители концентрации пыли. Среди недорогих измерителей концентрации пыли можно выделить датчики частиц, применяемые в портативных средствах мониторинга: PMS5003, NOVA SDS011, PMS1003, PMS3003, PMS7003, PPD42NS [14, 18, 19]. Представленные датчики пылевых частиц используются в общественных сетях мониторинга Sensor Community. Профессиональные датчики частиц Alphasense OPC-N2 применяются в приборе AirExpert Mini, разработанном фирмой ООО «Союзатомприбор» (проходят испытания в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург). Датчик PMS5003 используется в переносном измерителе концентрации мелкодисперсных аэрозолей (ПИКМА).

Измерение концентрации тонкодисперсных частиц выполнили путем прохождения газовой смеси через датчик. Лазерное излучение, проходящее через воздушную смесь, содержащую в своем составе твердые частицы, рассеивается ими; в зави-



Рис. 2. Мобильный измеритель концентрации пыли AirExpert Mini PM

Fig. 2. Mobile Dust Concentration Meter AirExpert Mini PM



Рис. 3. Измеритель концентрации мелкодисперсных аэрозолей (ПИКМА)

Fig. 3. Fine aerosol concentration meter (PIKMA)

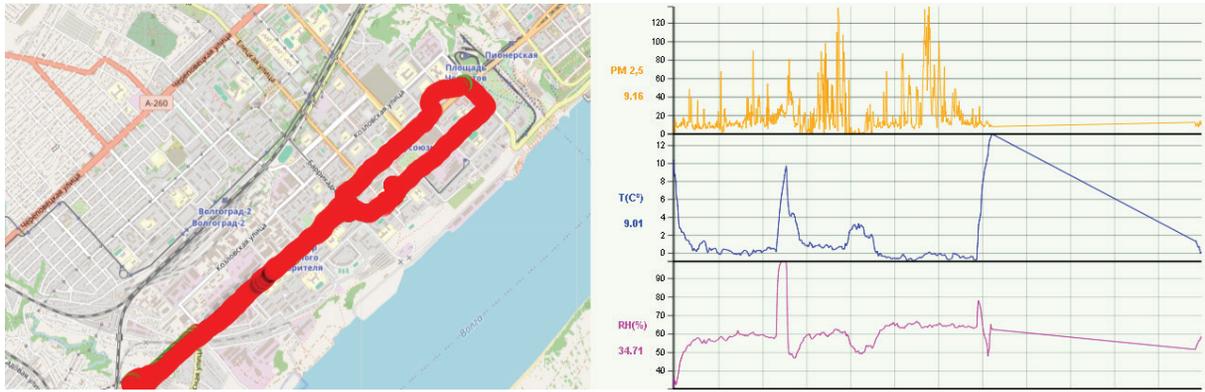


Рис. 4. Пример необработанных данных концентрации $PM_{2,5}$ (без учета метеорологических параметров)

Fig. 4. Example of raw $PM_{2,5}$ concentration data (excluding meteorological parameters)

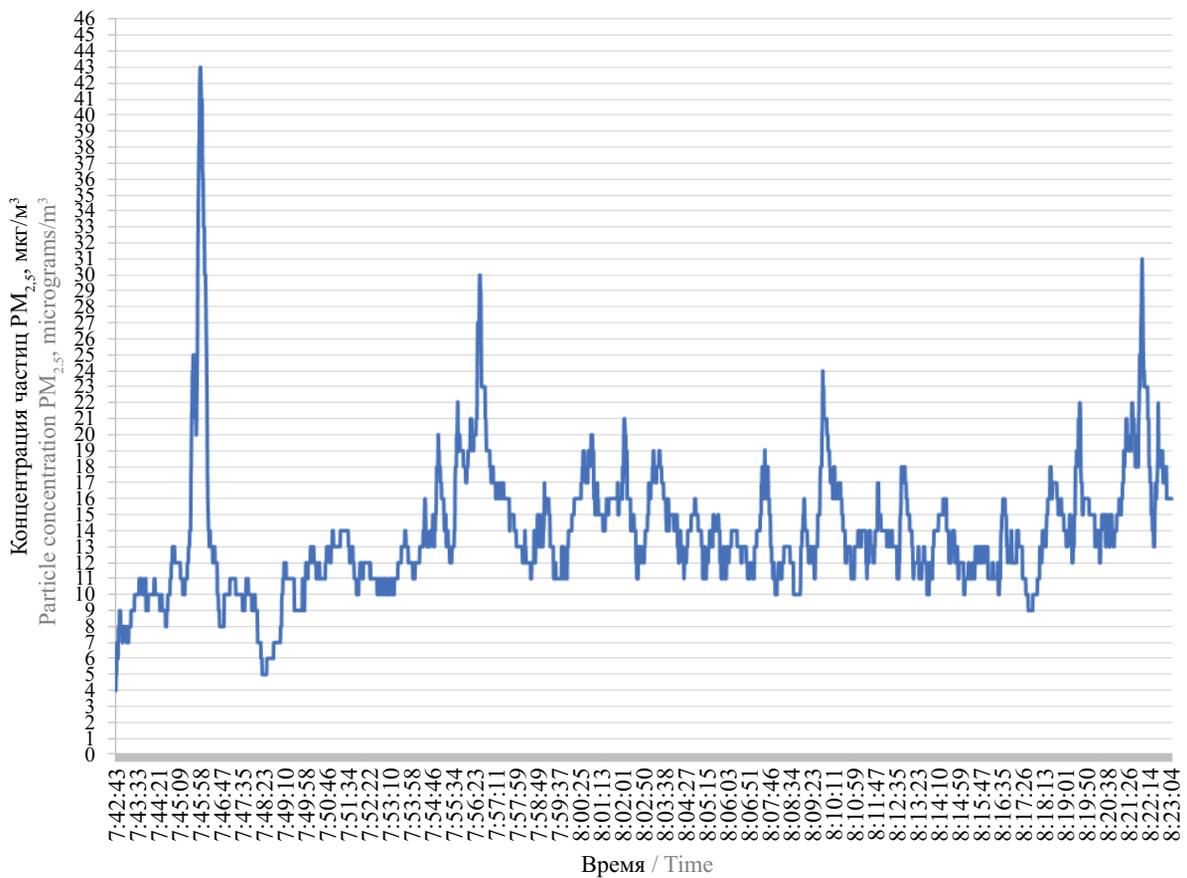


Рис. 5. Необработанные данные концентрации $PM_{2,5}$ (без учета метеорологических параметров)

Fig. 5. Raw $PM_{2,5}$ concentration data (excluding meteorological parameters)

симости от угла рассеяния и длины сигналов, попадающих на фотоприемник, определяли их диаметр и концентрацию (рис. 2, 3) [19].

Преимуществом измерителя AirExpert Mini PM является возможность передачи данных концентрации пыли в реальном времени на сайт (рис. 4).

Переносной измеритель концентрации мелкодисперсных аэрозолей в отличие от представленного AirExpert Mini PM записывает свои данные на встроенную SD-карту, также дополнительно в приборе установлен модуль GPS, с помощью ко-

торого происходит синхронизация даты и времени, определится местоположение. Необработанные данные переносного измерителя концентрации пыли представлены на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований адаптирована созданная авторами ранее модель, согласно которой в качестве показателя эффективности при выборе тех или иных решений по управлению ОКС на протяжении ЖЦ предложен универсальный

критерий [6]. В данной работе этот критерий оптимизации определяется исходя из расчетных значений приведенных удельных затрат на реализацию управляющих решений, степени пылевого загрязнения при выполнении различных работ в соответствии с принятыми решениями, а также вероятности наступления различных событий в зависимости от принятых решений. В нашем случае это, например, концентрация пыли на границе участка производства работ:

$$K_i = \sum_{k=1}^m \frac{C_{пр.уд.ik} \cdot \lambda_{ik}}{P_{ik} \cdot ПДК}, \quad (12)$$

где K_i — приведенный критерий, который позволяет в численном выражении представить эффективность i -го управленческого решения; $C_{пр.уд.ik}$ — технико-экономическая эффективность реализации i -го варианта из рассматриваемых управленческих решений на k -м этапе ЖЦ, которая рассчитывается как приведенные удельные затраты; λ_{ik} — значения

концентрации пылевого загрязнения воздушной среды, полученные экспериментальным или теоретическим путем³ (определяются как максимальные значения в контрольных точках на границах участка производства работ); ПДК — предельно допустимая концентрация мелкодисперсной пыли (максимальный разовый уровень для взвешенных частиц $PM_{2,5}$ — 160 мкг/м³, для PM_{10} — 300 мкг/м³)⁴.

Сформирована база данных о значениях концентрации пылевого загрязнения атмосферного воздуха при выполнении работ на всех этапах ЖЦ в соответствии с принятой декомпозицией. Некоторые данные измерений представлены в табл. 2.

³ Методы расчетов рассеивания вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : утв. Приказом Минприроды РФ от 06.06.2017 № 273. М. : Ростехнадзор, 2017. 110 с.

⁴ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (с Изменениями на 30.12.2022). Табл. 1.1 п.п. 110–112.

Табл. 2. Экспериментальные данные о содержании мелкодисперсной пыли при некоторых видах работ для расчета эффективности рассматриваемых управленческих решений

Table 2. Experimental data on the fine dust concentration in some types of work to calculate the effectiveness of the management decisions under consideration

Этапы ЖЦ в соответствии с принятой декомпозицией Stages of the LC in accordance with the accepted decomposition	Виды работ, вызывающие загрязнение атмосферного воздуха Types of work that cause atmospheric air pollution	Максимальная разовая концентрация мелкодисперсной пыли, мг/м ³ , при скорости ветра, не превышающей 9 м/с Maximum single concentration of fine dust, mg/mm ³ , at a wind speed not exceeding 9 m/s	
		на строительной площадке at the construction site	на расстоянии 100 м от рабочей зоны at a distance of 100 m from the work area
Инженерные изыскания (предпроектная подготовка) Engineering surveys (pre-design preparation)	Определение уровня грунтовых вод механическим способом Determination of the groundwater level by mechanical means	18–20	9–11
Производство и транспортировка строительных материалов и изделий Production and transportation of building materials and products	Производство цементных смесей Production of cement mixtures	23–25	7–9
Реализация проекта (строительство) Project implementation (construction)	Производство кирпичной кладки Production of brickwork	16–18	3–4
Эксплуатация Exploitation	Демонтаж керамической плитки Dismantling of ceramic tiles	26–30	8–10
Демонтаж и утилизация Dismantling and disposal	Демонтаж железобетонных конструкций Dismantling of reinforced concrete structures	32–40	10–12

Табл. 3. Вероятность превышения концентрации загрязняющего вещества (пыль неорганическая до 20 %) за пределами санитарно-защитной зоны

Table 3. The probability of exceeding the concentration of a contaminant (inorganic dust up to 20 %) outside the sanitary protection zone

Вид операции Operation type	Концентрация мелкодисперсных частиц, мг/м ³ Concentration of fine particles, mg/m ³		Общая концентрация (C _Σ), мг/м ³ Total concentration, (C _Σ), mg/m ³	Вероятность превышения ПДК _{МР} (P _{ik}) The probability of exceeding the MPC (P _{ik})
	Не более 10 мкм (PM ₁₀) No more than 10 microns (PM ₁₀)	Не более 2,5 мкм (PM _{2,5}) No more than 2.5 microns (PM _{2,5})		
Смешивание строительных растворов (цементных и песчаных) [14] Mixing of building mortars (cement and sand) [14]	4,76	0,265	–	0,15
Смешивание бетона (цемента, песка и крупнозернистых заполнителей) [14] Mixing of concrete (cement, sand and coarse-grained aggregates) [14]	7,36	0,47	–	До 0,21 To 0.21
Укладка монолитных бетонных блоков [20] Mixing of concrete (cement, sand and coarse-grained aggregates) [20]	1,017	0,175	0,432	До 0,12 To 0.12
Укладка слоя основания дорожного полотна [21] Laying the base layer of the roadway [21]	0,48	0,02	–	До 0,06 To 0.06
Резка деревянной плитки [22] Cutting of wooden tiles [22]	–	–	3,458	До 0,08 To 0.08
Уборка рабочей площадки [22] Cleaning of the work site [22]	–	–	1,217	До 0,24 To 0.24
Подготовка к нанесению лакокрасочного покрытия [22] Preparation for the application of paint and varnish coating [22]	–	–	32	До 0,42 To 0.42
Оштукатуривание [22] Plastering [22]	–	–	2,678	До 0,07 To 0.07

На этапе строительства объекта вероятность превышения максимальной разовой предельно-допустимой концентрации (ПДК_{МР}) мелкодисперсной пыли за пределами санитарно-защитной зоны при проведении технологических операций приведена в табл. 3.

Подставляя в формулу (12) данные, полученные с помощью применения построенной системы информационного обеспечения, определили наиболее эффективное решение по управлению ЖЦ ОКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанное информационное обеспечение позволяет учитывать случайный характер наступления тех или иных событий в течение ЖЦ ОКС с определением вероятности их наступления. Помимо того, введение в модель критерия, учитывающего степень пылевого загрязнения, дает возможность выбирать решение по управлению ЖЦ ОКС с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха.

Предложенная модель использовалась в качестве системы информационного обеспечения принятия оптимальных решений по управлению ЖЦ реальных объектов в г. Волгограде. Применение разработанной модели на протяжении всех этапов ЖЦ таких объектов продемонстрировало снижение трудоемкости поиска (до 14 %) и повышение эффективности и экологической безопасности (за счет

снижения до 20 % степени загрязнения атмосферного воздуха) управленческих решений.

Данная статья подготовлена в рамках выполнения гранта молодых ученых ВолГГТУ, финансируемого из средств программы «Приоритет–2030» «Разработка системы информационно-технологического обеспечения качества окружающей среды в условиях городской агломерации».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теличенко В.И., Липидус А.А., Морозенко А.А. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве. М. : Издательство АСВ, 2008. 144 с. EDN SAPKVZ.
2. Гинзбург А.В., Нестерова Е.И. Технология непрерывной информационной поддержки жизненного цикла строительного объекта // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 317. EDN OWECEN.
3. Katranov I., Lapidus A. Mobile building life cycle // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 03011. DOI: 10.1051/mateconf/201819303011
4. Бурлаченко О.В., Елфимов К.А., Бунин Д.В. Информационное обеспечение управления жизненным циклом строительных объектов в концепции BIM // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. № 54 (73). С. 217–221. EDN YUMLJJ.
5. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О. Система управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием цифровых технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 305–313. EDN QZAXQX.
6. Азаров В.Н., Бурлаченко А.О. Организация строительного производства с учетом экологичной безопасности принимаемых решений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 1 (41). С. 76–83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT.
7. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О., Плешаков В.В. Возможности цифровых технологий для каждого этапа жизненного цикла строительной системы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 2 (87). С. 317–325. EDN TJMJSS.
8. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Соболева Е.Д., Бурлаченко А.О., Плешаков В.В. К вопросу о стадиях жизненного цикла строительных систем в контексте принципов информационного моделирования // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 607–620. EDN ETPPQZ.
9. Muleski G.E., Cowherd C., Kinsey J.S. Particulate emissions from construction activities // Journal of the Air & Waste Management Association. 2005. Vol. 55. Issue 6. Pp. 772–783. DOI: 10.1080/10473289.2005.10464669
10. Azarmi F., Kumar P., Marsh D., Fuller G. Assessment of the long-term impacts of PM₁₀ and PM_{2.5} particles from construction works on surrounding areas // Environmental Science: Processes & Impacts. 2016. Vol. 18. Issue 2. Pp. 208–221. DOI: 10.1039/c5em00549c
11. Калюжина Е.А., Сергина Н.М., Елфимов К.А., Стреляева А.Б. Исследование пылевыделений в окружающую атмосферу и в атмосферу рабочей зоны при производстве ремонтно-строительных работ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 371–378. EDN CCPQTW.
12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Monitoring study on dust dispersion properties during earthwork construction // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 15. P. 8451. DOI: 10.3390/su13158451
13. Азаров В.Н., Елфимов К.А., Давудов Р.И.О., Васильев А.Н., Симаков В.С. Об использовании случайных функций для анализа пылевого загрязнения пешеходных зон // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 2 (87). С. 171–177. EDN HRHQRM.
14. Khan M., Khan N., Skibniewski M.J., Park C. Environmental Particulate Matter (PM) exposure assessment of construction activities using low-cost pm sensor and latin hypercubic technique // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 14. P. 7797. DOI: 10.3390/su13147797
15. Yang J., Shi B., Shi Y., Marvin S., Zheng Y., Xia G. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 54. P. 101941. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101941
16. Tao G.W., Feng J.C., Feng H.B., Feng H., Zhang K. Reducing construction dust pollution by planning construction site layout // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 531. DOI: 10.3390/buildings12050531
17. Сысоева Е.В., Гильманова М.О. Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 889–900. URL:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54137525> DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

18. Kaur K., Kelly K.E. Performance evaluation of the Alphasense OPC-N3 and Plantower PMS5003 sensor in measuring dust events in the Salt Lake Valley, Utah // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023. Vol. 16. Issue 10. Pp. 2455–2470. DOI: 10.5194/amt-16-2455-2023

19. Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Opportunities for low-cost particulate matter sensors in filter emission measurements // *Chemical Engineering & Technology*. 2018. Vol. 41. Issue 9. Pp. 1826–1832. DOI: 10.1002/ceat.201800209

20. Cheriyan D., Choi J.H. Data on different sized particulate matter concentration produced from a con-

struction activity // *Data in Brief*. 2020. Vol. 33. P. 106467. DOI: 10.1016/j.dib.2020.106467

21. Сидякин П.А., Маринин Н.А., Шульга С.В., Чичириков К.О. Дорожно-строительные работы как источник пылевого загрязнения воздушной среды // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2014. № 2 (15). С. 72–76. DOI: 10.17673/Vestnik.2014.02.12. EDN SXUBJX.

22. Kohlman-Rabbani E.R., Shapira A., Martins A.R.B., Barkokébas B. Characterization and evaluation of dust on building construction sites in Brazil // *The Open Occupational Health & Safety Journal*. 2014. Vol. 5. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.2174/1876216601405010001

Поступила в редакцию 6 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 января 2024 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

Об авторах: Валерий Николаевич Азаров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства, советник РААСН; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Олег Васильевич Бурлаченко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, заместитель директора Института архитектуры и строительства по научной работе; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 282520, Scopus: 417611032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Александр Олегович Бурлаченко — младший научный сотрудник, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: NHM-5981-2022, ORCID: 0000-0001-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com;

Мария Денисовна Азарова — магистрант, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1186126, ORCID: 0009-0009-3147-4333; azarovamaria@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Morozenko A.A. *Information modeling of technologies and business processes in construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 144. EDN SAPKVZ. (rus.).

2. Ginzburg A.V., Nesterova E.I. Technology of continuous information support of life cycle of construction object. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 5:317. EDN OWECEN. (rus.).

3. Katranov I., Lapidus A. Mobile building life cycle. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03011. DOI: 10.1051/mateconf/201819303011

4. Burlachenko O.V., Elfimov K.A., Bunin D.V. Information support of life cycle management

of construction projects in conception of BIM. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2018; 54(73):217-221. EDN YUMLJJ. (rus.).

5. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesy-an O.V., Burlachenko A.O. The life cycle management system for the capital construction objects using digital technologies. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2021; 4(85):305-313. EDN QZAXQX. (rus.).

6. Azarov V.N., Burlachenko A.O. The construction production organization taking into account the ecological safety of the decisions taken. *Biospheric Compat-*

ibility: *Human, Region, Technologies*. 2023; 1(41):76-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KXXFQT. (rus.).

7. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesy-an O.V., Burlachenko A.O., Pleshakov V.V. Possibilities of digital technologies for each stage of the life cycle of the building system. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2022; 2(87):317-325. EDN TJMJSS. (rus.).

8. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesyan O.V., Soboleva E.D., Burlachenko A.O., Pleshakov V.V. On the issue of the building systems life cycle stages in the context of the principles of information modeling. *Engineering journal of Don*. 2022; 6(90):607-620. EDN ETPPQZ. (rus.).

9. Muleski G.E., Cowherd C., Kinsey J.S. Particulate emissions from construction activities. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2005; 55(6):772-783. DOI: 10.1080/10473289.2005.10464669

10. Azarmi F., Kumar P., Marsh D., Fuller G. Assessment of the long-term impacts of PM₁₀ and PM_{2.5} particles from construction works on surrounding areas. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2016; 18(2):208-221. DOI: 10.1039/c5em00549c

11. Kalyuzhina E.A., Sergina N.M., Elfimov K.A., Strelyaeva A.B. Research of dust release in the surrounding atmosphere and into the atmosphere of the working area in production of repair and construction works. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020; 4(81):371-378. EDN CCPQTW. (rus.).

12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Monitoring study on dust dispersion properties during earthwork construction. *Sustainability*. 2021; 13(15):8451. DOI: 10.3390/su13158451

13. Azarov V.N., Elfimov K.A., Davudov R.I., Vasilev A.N., Simakov V.S. On the use of random functions for the analysis of dust pollution of pedestrian zones. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2022; 2(87):171-177. EDN HRHQRM. (rus.).

14. Khan M., Khan N., Skibniewski M.J., Park C. Environmental Particulate Matter (PM) exposure assessment of construction activities using low-cost PM sensor and latin hypercubic technique. *Sustainability*. 2021; 13(14):7797. DOI: 10.3390/su13147797

15. Yang J., Shi B., Shi Y., Marvin S., Zheng Y., Xia G. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 54:101941. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101941

16. Tao G.W., Feng J.C., Feng H.B., Feng H., Zhang K. Reducing construction dust pollution by planning construction site layout. *Buildings*. 2022; 12(5):531. DOI: 10.3390/buildings12050531

17. Sysoeva E.V., Gelmanova M.O. Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):889-900. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54137525> DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

18. Kaur K., Kelly K.E. Performance evaluation of the Alphasense OPC-N3 and Plantower PMS5003 sensor in measuring dust events in the Salt Lake Valley, Utah. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023; 16(10):2455-2470. DOI: 10.5194/amt-16-2455-2023

19. Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Opportunities for low-cost particulate matter sensors in filter emission measurements. *Chemical Engineering & Technology*. 2018; 41(9):1826-1832. DOI: 10.1002/ceat.201800209

20. Cheriyan D., Choi J.H. Data on different sized particulate matter concentration produced from a construction activity. *Data in Brief*. 2020; 33:106467. DOI: 10.1016/j.dib.2020.106467

21. Sidyakin P., Marinin N., Shul'ga S., Chichirov K. Road construction works as source of dust air pollution. *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*. 2014; 2(15):72-76. DOI: 10.17673/Vestnik.2014.02.12. EDN SXUBJX. (rus.).

22. Kohlman-Rabbani E.R., Shapira A., Martins A.R.B., Barkokébas B. Characterization and evaluation of dust on building construction sites in Brazil. *The Open Occupational Health & Safety Journal*. 2014; 5(1):1-8. DOI: 10.2174/1876216601405010001

Received October 6, 2023.

Adopted in revised form on January 9, 2024.

Approved for publication on January 10, 2024.

B I O N O T E S : **Valerii N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction, Advisor to RAASN; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 148320, Scopus: 7004170297, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production Technology, Deputy Director of the Institute of Architecture and Construction for Research; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI:

282520, Scopus: 417611032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Alexander O. Burlachenko — junior researcher, postgraduate student of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: HHM-5981-2022, ORCID: 0000-0001-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com;

Maria D. Azarova — master's student, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1186126, ORCID: 0009-0009-3147-4333; azarovamaria@yandex.ru.

*Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.469-477

Определение веса элемента с целью приоритизации исправления коллизий пересечения

Сергей Иванович Евтушенко, Роман Витальевич Осташев*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Предлагается оптимизировать время высококвалифицированных инженеров, работающих с цифровой информационной моделью (ЦИМ) в процессе исправления коллизий пересечения за счет математического определения важности того или иного элемента в коллизиях пересечения.

Материалы и методы. За основу принят метод частотного анализа с использованием коэффициента качества ЦИМ. Коэффициент качества ЦИМ устанавливается исходя из данных о ЦИМ: количество элементов, объектов и коллизий. Вычисленные коэффициенты влияют на результаты, полученные с помощью метода частотного анализа. В итоге получаются уникальные значения весов важности для элементов ЦИМ.

Результаты. Найденные в ходе исследования веса элементов отсортированы по убыванию, первые 20 % элементов с наибольшим весом занимают элементы несущих конструкций, это говорит о том, что исправление коллизий с их участием должно быть в приоритете. Приоритет исправления коллизий с участием других, не несущих элементов ЦИМ, можно определить, назначив им веса исходя из элементов, участвующих в коллизиях.

Выводы. Результаты исследования помогут назначить приоритет найденным коллизиям пересечения, что даст возможность высококвалифицированным инженерам исправлять наиболее важные коллизии пересечения в приоритетном порядке, тем самым рациональнее используя свое время. Полученные значения весов элементов можно применять, экспортировав найденные в проекте коллизии в табличный формат данных. Используя табличные редакторы и функции сводных таблиц, можно назначить веса элементам и отсортировать коллизии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии информационного моделирования, BIM, ТИМ, цифровые информационные модели, коллизии, коллизии пересечения, вес элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Евтушенко С.И., Осташев Р.В.* Определение веса элемента с целью приоритизации исправления коллизий пересечения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 469–477. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.469-477

Автор, ответственный за переписку: Роман Витальевич Осташев, lemon-noman@yandex.ru.

Determination of element weight for the purpose of prioritization of intersection collision correction

Sergey I. Evtushenko, Roman V. Ostashev*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. It is proposed to optimize the time of highly qualified engineers working with a building information model (BIM) during the correction of intersection collisions due to mathematical determination of importance of an element in intersection collisions.

Materials and methods. The method of frequency analysis is taken as a basis, using the quality coefficient of BIM. The quality coefficient of BIM is determined based on the data about the BIM itself: number of elements, objects and collisions. The calculated coefficients influence the results obtained using the frequency analysis method. As a result, unique values of importance weights for BIM elements are obtained.

Results. The weights of the elements found during the study are sorted in descending order, the first 20 % of the elements with the highest weight are the load-bearing structures, indicating that fixing collisions involving them should be a priority. The priority of correcting collisions involving other non-bearing elements of the BIM can be determined by assigning weights to them based on the elements involved in collisions.

Conclusions. The results of the study will help to assign priority to the intersection collisions found. This, in turn, will allow highly qualified engineers to fix the most important intersection collisions in a priority order, thereby using their time more efficiently. The resulting element weights can be applied by exporting the collisions found in the project to a tabular data format. Using tabular editors and pivot table functions, you can assign weights to elements and sort collisions.

KEYWORDS: building information model, BIM, digital information models, collisions, intersection collisions, element weights

FOR CITATION: Evtushenko S.I., Ostashev R.V. Determination of element weight for the purpose of prioritization of inter-section collision correction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):469-477. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.469-477 (rus.).

Corresponding author: Roman V. Ostashev, lemon-noman@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества принимаемых проектных решений — одна из задач цифровизации строительной отрасли, с которой сталкивается каждый проектный институт при переходе на технологии информационного моделирования, такие задачи называют BIM-сценарии (BIM use). Поиск коллизий пересечения (далее — коллизии) цифровых информационных моделей (ЦИМ) является одним из способов выполнения такого BIM-сценария.

С ростом размера объекта капитального строительства и увеличением числа разрабатываемых дисциплин количество внутри- и междисциплинарных коллизий увеличивается. Но не все коллизии между собой равны, есть те, исправление которых имеет больший приоритет, например, это могут быть коллизии с участием несущих элементов или сложного технологического оборудования, также существуют коллизии, на исправление которых уйдет в разы больше времени и денег, чем на исправление их на строительной площадке, например коллизии с метизами. Встает вопрос о сортировке коллизий и приоритизации их исправления специалистами.

Исследователи сходятся во мнении о необходимости таких проверок как внутри одной дисциплины, так и между дисциплинами [1–13].

Также много внимания уделяется коллизиям пересечения инженерных сетей как друг с другом, так и с архитектурно-конструктивными элементами [14–18]; коллизии конструктива и архитектуры в публикациях встречаются реже.

Цель исследования — определение методики математического нахождения веса элемента на основе выборки ЦИМ из открытых источников. Статья служит логическим продолжением предыдущей публикации [19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные данные

Для получения исходных сведений необходимо как можно большее количество ЦИМ, которые будут проанализированы по описанным ниже формулам. Большее количество ЦИМ увеличит охват элементов и позволит получить более достоверные результаты.

В качестве исходных данных необходимо с помощью инструмента работы с ЦИМ и табличного редактора определить следующие переменные:

- 1) C_j — количество коллизий в j -й ЦИМ;
- 2) E_j — количество элементов в j -й ЦИМ;
- 3) O_j — количество объектов в j -й ЦИМ (элементы состоят из объектов);

4) F_{ij} — частота i -го элемента в коллизиях j -й ЦИМ.

В первую очередь следует установить k_j — коэффициент объективного качества j -й ЦИМ, поскольку коллизии из более проработанной и детализированной ЦИМ (по-другому — более качественной ЦИМ) должны иметь больший вес в итоговом результате, по сравнению с менее качественными ЦИМ. Коэффициент качества ЦИМ определяется математически из первых трех переменных для каждой ЦИМ в отдельности.

Также качество ЦИМ можно оценивать и субъективно, например, с помощью метода экспертной оценки (в данном случае не используется).

Определение коэффициента качества ЦИМ

Для определения объективного коэффициента качества ЦИМ необходимо определить \bar{Q}_j — среднее значение отношения между количеством элементов и объектов к количеству найденных коллизий в j -й ЦИМ (формула (3)) и D — детализацию j -й ЦИМ (формула (4)).

Количество элементов на коллизию в j -й ЦИМ устанавливается по формуле:

$$Q_e = E_j / C_j, \quad (1)$$

где E_j — количество элементов в j -й ЦИМ; C_j — количество коллизий в j -й ЦИМ.

Количество объектов на коллизию в j -й ЦИМ определяется по выражению:

$$Q_o = O_j / C_j, \quad (2)$$

где O_j — количество объектов в j -й ЦИМ.

Среднее значение j -й ЦИМ определяется по формуле (3). Значение \bar{Q}_j показывает зрелость ЦИМ, чем больше количество элементов и объектов на коллизию, тем ЦИМ более проработана:

$$\bar{Q}_j = \frac{Q_e + Q_o}{2} = \frac{E_j + O_j}{2C_j}. \quad (3)$$

Детализация представляет собой отношение количества объектов к количеству элементов j -й ЦИМ.

Детализация j -й ЦИМ рассчитывается по выражению (4). Значение D показывает детализацию модели, сколько объектов используется в элементах ЦИМ:

$$D = \frac{O_j}{E_j}. \quad (4)$$

Коэффициент качества j -й ЦИМ устанавливается по формуле (5). Значение k_j показывает качество проектных решений и качество моделирования ЦИМ:

$$k_j = \bar{Q}_j \cdot D. \quad (5)$$

Коэффициент k_j рассчитывается для каждой ЦИМ, которая участвует в определении весов элементов.

Определение веса элемента

Для расчета веса элемента требуется найти U_{ij} — однотипность j -й ЦИМ по i -му элементу. Поскольку в ЦИМ могут преобладать определенные типы элементов, с помощью выявления однотипности можно понизить приоритет таких однотипных ЦИМ.

Однотипность j -й ЦИМ по i -му элементу рассчитывается по формуле (6). Значение U_{ij} показывает отношение количества i -го элемента, найденного в коллизиях, к количеству всех элементов j -й ЦИМ:

$$U_{ij} = \frac{E_i}{E_j}, \tag{6}$$

где E_i — количество i -го элемента, найденного в коллизиях j -й ЦИМ.

Вес i -го элемента в j -й ЦИМ рассчитывается следующим образом:

$$W_{ij} = k_j \frac{F_{ij}}{U_{ij}}, \tag{7}$$

где F_{ij} — частота i -го элемента, найденного в коллизиях j -й ЦИМ.

Итоговый вес i -го элемента находится так:

$$W_i = \sum_{k=1}^n W_{ij}, \tag{8}$$

где n — количество ЦИМ, в коллизиях которых найден i -й элемент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования было проанализировано 24 ЦИМ из открытых источников, определение их коэффициента качества представлено в табл. 1.

Из полученных значений видно, что коэффициенты качества у ЦИМ под номерами 11 и 19 несоразмерно большие, а у 3 и 5 несоразмерно малы, необходимо выполнить процедуру проверки крайних значений на высказывание. Проверка основана на оценке соотношения «расстояния» крайних

Табл. 1. Определение коэффициента качества ЦИМ

Table 1. Determination of the quality coefficient of BIM

Номер ЦИМ BIM Number	C_j	E_j	O_j	\bar{Q}_j	D	k_j
1	7112	151 295	527 457	47,72	3,49	166,36
2	28	4439	11 832	290,55	2,67	774,46
3	3465	17 314	18 596	5,18	1,07	5,57
4	299	909	2631	5,92	2,89	17,13
5	1572	25 583	16 950	13,53	0,66	8,96
6	127	22 869	12 282	138,39	0,54	74,32
7	7	128	245	26,64	1,91	51,00
8	1915	13 596	71 877	22,32	5,29	117,98
9	152	8195	10 931	62,91	1,33	83,92
10	90	16 284	31 736	266,78	1,95	519,93
11	7	6090	42 593	3477,36	6,99	24 320,37
12	5	121	120	24,10	0,99	23,90
13	20	1649	2969	115,45	1,80	207,87
14	103	5688	9230	72,42	1,62	117,51
15	429	15 793	24 821	47,34	1,57	74,39
16	249	5994	8172	28,45	1,36	38,78
17	289	4490	8764	22,93	1,95	44,76
18	11	1586	796	108,27	0,50	54,34
19	2	163	6421	1646,00	39,39	64 840,28
20	19	240	528	20,21	2,20	44,46
21	13	1251	2769	154,62	2,21	342,23
22	225	37 151	25 891	140,09	0,70	97,63
23	261	7586	11 507	36,58	1,52	55,48
24	7464	150 756	96 350	16,55	0,64	10,58

значений и ближайших к ним и размаха всех значений [20]. Выполняется сортировка по убыванию коэффициента качества (табл. 2).

Вычисляется шесть τ -критериев для проверки выскакивающих значений:

1) τ_1^h -критерий при подозрении в выскакивании большего значения вычисляется по формуле:

$$\tau_1^h = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} > \tau_1^{cr}, \quad (9)$$

где x_n — наибольшее значение, подозреваемое в выскакивании; x_{n-1} — значение перед наибольшим в сторону убывания; x_1 — наименьшее значение; τ_1^{cr} — критическое значение (табличное [15]), для списка из 24 элементов при 1 %-ном уровне значимости $\tau_1^{cr} = 0,367$, при 5 %-ном уровне значимости $\tau_1^{cr} = 0,281$;

Табл. 2. Отсортированные по убыванию коэффициенты качества

Table 2. Quality coefficients sorted in descending order

Номер ЦИМ Number BIM	k_j
19	64 840,28
11	24 320,37
2	774,46
10	519,93
21	342,23
13	207,87
1	166,36
8	117,98
14	117,51
22	97,63
9	83,92
15	74,39
6	74,32
23	55,48
18	54,34
7	51,00
17	44,76
20	44,46
16	38,78
12	23,90
4	17,13
24	10,58
5	8,96
3	5,57

2) τ_2^h -критерий при подозрении в выскакивании и большего, и наименьшего значения (вычисляется по наибольшему значению):

$$\tau_2^h = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2} > \tau_2^{cr}, \quad (10)$$

где x_2 — значение после наименьшего в сторону увеличения; τ_2^{cr} — критическое значение (табличное [15]), для списка из 24 элементов при 1 %-ном уровне значимости $\tau_2^{cr} = 0,400$, при 5 %-ном уровне значимости $\tau_2^{cr} = 0,309$;

3) τ_3^h -критерий при подозрении в выскакивании двух наибольших значений:

$$\tau_3^h = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_1} > \tau_3^{cr}, \quad (11)$$

где x_{n-2} — значение после второго наибольшего в сторону уменьшения; τ_3^{cr} — критическое значение (табличное [15]), для списка из 24 элементов при 1 %-ном уровне значимости $\tau_3^{cr} = 0,347$, при 5 %-ном уровне значимости $\tau_3^{cr} = 0,434$;

4) τ_1^s -критерий при подозрении в выскакивании наименьшего значения вычисляется следующим образом:

$$\tau_1^s = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} > \tau_1^{cr}; \quad (12)$$

5) τ_2^s -критерий при подозрении в выскакивании двух наименьших значений рассчитывается по формуле (13) (вычисляется по наименьшему значению):

$$\tau_2^s = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_2} > \tau_2^{cr}; \quad (13)$$

6) τ_3^s -критерий при подозрении в выскакивании двух наименьших значений вычисляется по выражению:

$$\tau_3^s = \frac{x_3 - x_1}{x_n - x_1} > \tau_3^{cr}, \quad (14)$$

где x_3 — значение после второго наименьшего в сторону увеличения.

Вычисленные значения τ -критериев представлены в табл. 3.

Вычисленные τ -критерии $\tau_1^h > \tau_1^{cr}$, $\tau_2^h > \tau_2^{cr}$ и $\tau_3^h > \tau_3^{cr}$ как с 1 %-ным, так и с 5 %-ным уровнем значимости, следовательно, значения k_j для 11 и 19 ЦИМ являются выскакивающими и не должны учитываться в дальнейшем.

Вычисленные τ -критерии $\tau_1^s < \tau_1^{cr}$, $\tau_2^s < \tau_2^{cr}$ и $\tau_3^s < \tau_3^{cr}$ как с 1 %-ным, так и с 5 %-ным уровнем значимости, следовательно, значения k_j для 3 и 5 ЦИМ не являются выскакивающими и должны учитываться в дальнейшем.

В итоге коэффициенты качества ЦИМ выглядят, как показано на рис. 1.

После определения коэффициента качества устанавливается W_{ij} — вес i -го элемента в j -й ЦИМ

Табл. 3. Вычисление τ-критериев

Table 3. Calculation of the τ-criteria

τ-критерий τ-criterion	τ	τ _n ^{cr} (1 %)	τ _n ^{cr} (5 %)	τ – τ _n ^{cr} (1 %)	τ – τ _n ^{cr} (5 %)
τ ₁ ^h	0,625	0,367	0,281	0,258	0,344
τ ₂ ^h	0,625	0,400	0,309	0,225	0,316
τ ₃ ^h	0,988	0,347	0,434	0,641	0,554
τ ₁ ^s	0,524 · 10 ⁻⁴	0,367	0,281	-0,367	-0,281
τ ₂ ^s	0,524 · 10 ⁻⁴	0,400	0,309	-0,400	-0,309
τ ₃ ^s	0,773 · 10 ⁻⁴	0,347	0,434	-0,347	-0,434

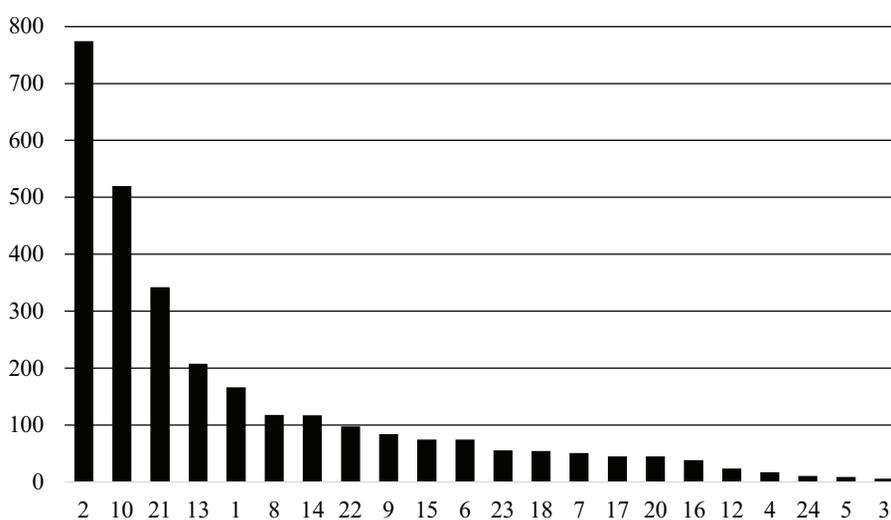


Рис. 1. Коэффициенты качества ЦИМ после исключения выпадающих значений

Fig. 1. Quality coefficients of BIM after exclusion of drop-down values

Табл. 4. Часть таблицы расчета веса элемента

Table 4. Part of the element weight calculation table

Класс IFC IFC class	F _{ij}	E _i	E _j	U _{ij}	k _j	W _{ij}
IfcBeam	9	541	4439	0,122	774,46	57 191,22
IfcColumn	20	80	4439	0,018	774,46	859 456,99
IfcSlab	27	20	4439	0,005	774,46	4 641 067,72
IfcColumn	14	349	16 284	0,021	519,93	339 631,98
IfcCovering	2	598	16 284	0,037	519,93	28 316,19
IfcDoor	9	435	16 284	0,027	519,93	175 169,80
IfcFurnishingElement	5	201	16 284	0,012	519,93	210 610,45
IfcMember	16	7039	16 284	0,432	519,93	19 244,87
IfcPlate	22	2690	16 284	0,165	519,93	69 243,08
IfcRailing	1	89	16 284	0,005	519,93	95 129,66
IfcSlab	5	24	16 284	0,001	519,93	1 763 862,53
IfcStair	1	60	16 284	0,004	519,93	141 109,00
...

Табл. 5. Веса элементов

Table 5. Weights of elements

Номер Number	Класс IFC IFC class	Наименование Name	W_i
1	IfcSlab	Перекрытие / Slab	387,779
2	IfcBeam	Балка / Beam	201,622
3	IfcColumn	Колонна / Column	144,481
4	IfcWall	Стена / Wall	107,183
5	IfcStair	Лестница / Stair	93,303
6	IfcRoof	Крыша / Roof	29,827
7	IfcFooting	Фундамент / Footing	4,960
8	IfcDoor	Дверь / Door	4,866
9	IfcDuctSegment	Воздуховод / Duct segment	4,329
10	IfcUnitaryEquipment	Оборудование / Unitary equipment	3,300
11	IfcWindow	Окно / Window	2,540
12	IfcRailing	Перилла / Railing	2,502
13	IfcRampFlight	Пролет пандуса / Ramp flight	2,256
14	IfcSanitaryTerminal	Сантехническое оборудование / Sanitary terminal	1,613
15	IfcStairFlight	Лестничный марш / Stair flight	1,601
16	IfcFurnishingElement	Мебель / Furnishing element	1,392
17	IfcDuctFitting	Фитинг для воздуховодов / Duct fitting	1,152
18	IfcCableSegment	Кабель / Cable segment	1,011
19	IfcCovering	Отделка / Covering	0,951
20	IfcPump	Насос / Pump	0,753
21	IfcPlate	Пластина / Plate	0,731
22	IfcPipeSegment	Труба / Pipe segment	0,653
23	IfcPipeFitting	Фитинг для труб / Pipe fitting	0,491
24	IfcDistributionElement	Элемент распределения / Distribution element	0,276
25	IfcDistributionControlElement	Элемент автоматизации здания / Distribution control element	0,229
26	IfcMember	Метизы / Member	0,168
27	IfcRamp	Пандус / Ramp	0,027
28	IfcCurtainWall	Навесная стена / Curtain wall	0,004

(формула (7)). Поскольку элементов и ЦИМ много, то в табл. 4 представлена только часть расчета.

Далее по формуле (8) определяется W_i — вес каждого i -го элемента. Веса элементов представлены в табл. 5 и на рис. 2. Для удобства дальнейшей работы абсолютные веса W_i приведены в относительном виде от общей суммы весов (общая сумма весов принята за 1000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

После проведенного анализа видно, что наибольшим приоритетом обладают архитектурные и несущие конструктивные элементы: перекрытие, балка, колонна, стена, лестница и крыша. Используя значения данных весов, можно выполнить сортировку коллизий и определить приоритет их исправления, что увеличит рацио-

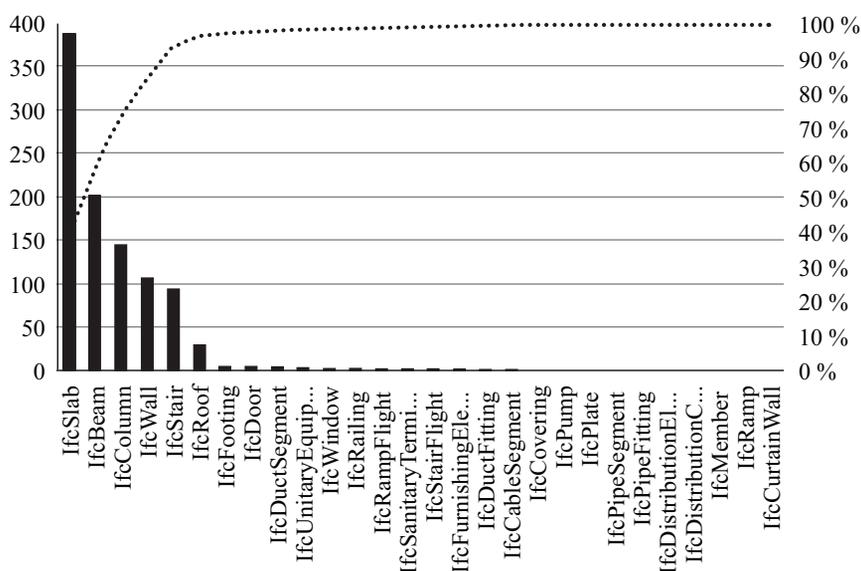


Рис. 2. Распределение весов элементов

Fig. 2. Distribution of weights of elements

нальность использования времени высококвалифицированных инженеров, занятых в работе над проектом.

С целью улучшения качества полученных данных необходимо увеличить выборку ЦИМ, применяемую в анализе, и при возможности использовать проклассифицированные модели. Использование класса IFC в качестве уникального кода типа элемента не удовлетворяет точности, например, элементы с высоким приоритетом — перекрытие и стена, могут быть как архитектурными, так и не-

сущими. С помощью проклассифицированных моделей возможно более точно распределить веса элементов для их приоритизации.

Для направлений дальнейшего исследования можно выделить: улучшение методики определения коэффициента качества ЦИМ и весов элементов, проведение экспертного анализа и сравнение его с данными, полученными математическим путем, следует также попробовать выделить в группы элементы с малым приоритетом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захарова Ю., Шишкина М. Автоматические проверки на коллизии в Pilot-BIM // САПР и графика. 2021. № 6 (296). С. 30–36. EDN NQPPDK.
2. Как BIM помогает выявлять коллизии: опыт пользователя системы Renga // САПР и графика. 2022. № 6 (308). С. 14–17. EDN TCXRKB.
3. Субботина М. Российские BIM-технологии: CADLib Модель и Архив как инструмент BIM-менеджера // САПР и графика. 2022. № 1 (303). С. 41–45. EDN WTFNYE.
4. Алиева Д.Н. Разработка алгоритма поиска коллизий при построении BIM-модели // Строительство — формирование среды жизнедеятельности. XXI Международная научная конференция : сб. мат. семинара «Молодежные инновации». 2018. С. 8–10. EDN USLUBL.
5. Алиева Д.Н. Автоматизация поиска коллизий при построении BIM-модели // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. 2018. С. 323–325. EDN XSYKUP.
6. Реммельг Я.А., Шиянов М.А., Кучеренко А.С. Автоматизированные проверки на коллизии в про-

- грамме Pilot-BIM // Образование. Наука. Производство : сб. докл. XIV Междунар. молодежного форума. 2022. С. 223–227. EDN JEUFWA.
7. Лопухина В.П., Михалева Е.А. Концепция BIM-технологии при проектировании, или технологии в BIM-проектировании // XVI Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : мат. Всерос. науч. конф. 2023. С. 189–191. EDN IZJDCK.
8. Юдаева Д.Е. BIM-технологии и экспертиза проектной документации // Мат. Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов, докторантов и молодых ученых. 2020. С. 69–73. EDN IRWTCU.
9. Ostashev R. Automated verification of information models for capital construction projects to mitigate environmental impact // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 383. P. 04073. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304073
10. Strug B., Ślusarczyk G. Reasoning about accessibility for disabled using building graph models based on BIM/IFC // Visualization in Engineering. 2017. Vol. 5. Issue 1. Pp. 1–12. DOI: 10.1186/s40327-017-0048-z. EDN ZJVJNP.

11. Lu Y., Zhang C. Dynamic data monitoring of building information of nano-modified building steel structure materials using BIM Model // *Integrated Ferroelectrics*. 2021. Vol. 216. Issue 1. Pp. 197–213. DOI: 10.1080/10584587.2021.1911269. EDN LMDDTI.

12. Alamedy Sh.G.H. Execution quality of construction projects with building information modeling BIM-technology // *Engineering Journal of Don*. 2023. No. 4 (100). Pp. 661–683. EDN LQAWPY.

13. Емельянов Е.Г. Современные технологии информационного моделирования — building information modeling (BIM) // *Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. инженерно-строительного института ИВГПУ*. 2018. С. 181–183. EDN XVODFZ.

14. Червова Н.А., Лепешкина Д.О. Коллизии инженерных систем при проектировании в BIM платформах // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2018. № 3 (66). С. 19–29. DOI: 10.18720/CUBS.66.2. EDN ХТΥVNZ.

15. Червова Н.А., Лепешкина Д.О. Инструменты поиска коллизий инженерных систем при работе в BIM-платформах // *Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : электронный сб. ст. по мат. LXIV студ. междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 22–29. EDN ХONKXJ.

16. Кочкарева М.Б. Преимущества BIM-технологий при решении проблемных вопросов реновации и реконструкции инженерных сетей // *Инновационные методы организации строительного производства : мат. II Всерос. науч.-практ. конф.* 2023. С. 126–131. EDN ZRIJDW.

17. Иванов А.Ю., Ливанов В.А. BIM-модели: борьба с коллизиями при проектировании инженерных систем // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2023. № 5. С. 52–64. EDN YJRKUS.

18. Курас М.В., Исламгалиева Д.Р., Нурисламова Р.К. Управление инженерными сетями здания с помощью BIM-модели // *Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук : мат. Междунар. науч.-техн. конф.* 2021. С. 17–21. EDN NPZCBO.

19. Евтушенко С.И., Осташеев Р.В. Сортировка коллизий пересечения // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 3. С. 10. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-10-10. EDN KFKUHU.

20. Ашмарин И.П., Воробьев А.А. Статистические методы в микробиологических исследованиях. Л. : Медгиз, 1962. 180 с.

Поступила в редакцию 1 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 12 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Иванович Евтушенко** — доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем, технологий и автоматизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 510652, Scopus: 57190962075, ResearcherID: C-5249-2013, ORCID: 0000-0003-3708-380X; evtushenkosi@mgsu.ru;

Роман Витальевич Осташеев — аспирант кафедры информационных систем, технологий и автоматизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9659-3199, ORCID: 0009-0002-8737-3813; lemon-noman@yandex.ru.

Вклад авторов:

Евтушенко С.И. — научное руководство, написание и редактирование текста.

Осташеев Р.В. — разработка методик, написание и редактирование текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zakharova Yu., Shishkina M. Automatic collision checks in Pilot-BIM. *CAD and Graphics*. 2021; 6(296):30-36. EDN NQPPDK. (rus.).

2. How BIM helps to identify collisions: user experience of the Renga system. *CAD and Graphics*. 2022; 6(308):14-17. EDN TCXRKB. (rus.).

3. Subbotina M. Russian BIM technologies: CADLib Model and Archive as a BIM manager tool. *CAD and Graphics*. 2022; 1(303):41-45. EDN WTFNYE. (rus.).

4. Alieva D.N. Development of an algorithm for finding collisions when building a BIM model. Construction is the formation of a living environment. *XXI International Scientific Conference : collection of materials from the seminar "Youth Innovations"*. 2018; 8-10. EDN USLUBL. (rus.).

5. Alieva D.N. Automating the search for collisions when building a BIM model. *Days of Student Science : collection of reports of a scientific and technical conference*. 2018; 323-325. EDN XSYKUP. (rus.).

6. Remmelg Ya.A., Shiyanov M.A., Kucherenko A.S. Automated checks for collisions in the Pilot-BIM program. *Education. Science. Production : collection of reports of the XIV International Youth Forum*. 2022; 223-227. EDN JEUFWA. (rus.).
7. Lopukhina V.P., Mikhaleva E.A. The concept of BIM technology in design, or technologies in BIM design. *XVI Annual scientific session of graduate students and young scientists : materials of the All-Russian Scientific Conference*. 2023; 189-191. EDN IZJDC. (rus.).
8. Yudaeva D.E. BIM technologies and expertise of project documentation. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of graduate students, doctoral students and young scientists*. 2020; 69-73. EDN IRWTCU. (rus.).
9. Ostashev R. Automated verification of information models for capital construction projects to mitigate environmental impact. *E3S Web of Conferences*. 2023; 383:04073. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304073
10. Strug B., Ślusarczyk G. Reasoning about accessibility for disabled using building graph models based on BIM/IFC. *Visualization in Engineering*. 2017; 5(1):1-12. DOI: 10.1186/s40327-017-0048-z. EDN ZJVJNP.
11. Lu Y., Zhang C. Dynamic data monitoring of building information of nano-modified building steel structure materials using BIM model. *Integrated Ferroelectrics*. 2021; 216(1):197-213. DOI: 10.1080/10584587.2021.1911269. EDN LMDDTI.
12. Alamedy Sh.G.H. Execution quality of construction projects with building information modeling BIM-technology. *Engineering Journal of Don*. 2023; 4(100):661-683. EDN LQAWPY.
13. Emelyanov E.G. Modern technologies of information modeling — building information modeling (BIM). *Engineering and Social systems : collection of scientific papers of the Institute of Civil Engineering of the IVSPU*. 2018; 181-183. EDN XVODFZ. (rus.).
14. Chervova N.A., Lepeshkina D.O. Collisions of general utilities designing through the use of BIM-platforms. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 3(66):19-29. DOI: 10.18720/CUBS.66.2. EDN XTYVNZ. (rus.).
15. Chervova N.A., Lepeshkina D.O. Tools for finding collisions of engineering systems when working in BIM platforms. Scientific community of students of the XXI century. *Technical Sciences : electronic collection of articles based on the materials of the LXIV student International Scientific and Practical Conference*. 2018; 22-29. EDN XONKXJ. (rus.).
16. Kochkareva M.B. Advantages of BIM technologies in solving problem issues of renovation and reconstruction of external utilities. *Innovative methods of organizing construction production : materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2023; 126-131. EDN ZRIJDW. (rus.).
17. Ivanov A.Yu., Livanov V.A. BIM-models: the fight against collisions in the design of engineering systems. *AVOK*. 2023; 5:52-64. EDN YJRKUS. (rus.).
18. Kuras M.V., Islamgalieva D.R., Nurislamova R.K. Management of building engineering networks using a BIM model. *Actual problems of technical, natural and humanitarian sciences : proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2021; 17-21. EDN NPZCBO. (rus.).
19. Evtushenko S., Ostashev R. Sorting of intersection collisions. *Construction and Architecture*. 2023; 11(3):10. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-10-10. EDN KFKUHU. (rus.).
20. Ashmarin I.P., Vorobyev A.A. *Statistical methods in microbiological research*. Leningrad, Medgiz Publ., 1962; 180. (rus.).

Received December 1, 2023.

Adopted in revised form on December 8, 2023.

Approved for publication on January 12, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey I. Evtushenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 510652, Scopus: 57190962075, ResearcherID: C-5249-2013, ORCID: 0000-0003-3708-380X; evtushenkosi@mgsu.ru;

Roman V. Ostashev — postgraduate student of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9659-3199, ORCID: 0009-0002-8737-3813; lemon-noman@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergey I. Evtushenko — scientific guidance, writing and editing of the text.

Roman V. Ostashev — development of methodology, writing and editing of the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (a , b и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова **«Вклад авторов:» (Contribution of the authors:)**. После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить пункты прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников **на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupurev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению 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 литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательнее раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводятся 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 теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
 подписка на январь, февраль, март, апрель,
 май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. _____

плательщика _____

Адрес _____

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

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 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
 подписка на январь, февраль, март, апрель,
 май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. _____

плательщика _____

Адрес _____

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

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 безоплатательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



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 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 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 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 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 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 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 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

