

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 11/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 11
2021**

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

Сквозной номер 156

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 11
2021**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.11.2021.
Подписан в свет	30.11.2021.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,09. Тираж 100 экз. Заказ № 1410	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

Павел Алексеевич Акимов, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Милан Голицки, д-р, проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

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

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

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

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

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

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

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

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

Андрей Будимирович Пономарев, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, 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., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*

Дизайн и верстка: *Алина Германовна Алейникова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

Юрий Михайлович Баженов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный

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

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

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

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

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

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

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

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

Евгений Иванович Пунырев, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

Владимир Ильич Травуш, д-р техн. наук, проф., академик и вице-президент РААСН, зам. генерального директора-главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

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

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

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

Павел Александрович Хаванов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогазоснабжения и вентиляции, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.11.2021.

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Alina G. Aleynikova*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ekaterina V. Nezhnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

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

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

Oleg G. Primin, "MosVodoKanalNIIProekt" JSC, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

Vladimir I. Travush, CJSC "Gorproject", Moscow, Russian Federation

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

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

Yas'kova N. Yur'evna, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Пария Ильдарабади, Саманех Асади, И.С. Шукуров

**The orientation of residential development in Mashhad that takes account of daylight
 (Региональная ориентация в жилой застройке Мешхеда с учетом дневного света) 1419**

С.В. Привезенцева, С.И. Пичугин

**Системный подход в расчете ширины пешеходных коммуникаций
 в транспортно-пересадочных узлах 1430**

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

И.С. Аксенов, А.П. Константинов

**Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния
 оконных профилей ПВХ при действии температурных нагрузок 1437**

К.Н. Макаров, Е.Е. Юрченко, Э.К. Бирюкбаев, В.Е. Юрченко

**Исследование резонансных характеристик
 гидротехнических сооружений и зданий на малоразмерных моделях 1452**

В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, Фан Динь Гуок

**Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами,
 усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях 1462**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И.Н. Максимова, И.В. Ерофеева, В.В. Афонин, Д.В. Емельянов

**Оценка качества цементных композитов, экспонированных
 в температурно-агрессивной среде, с применением интерполирования и корреляции. 1473**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.А. Анискин, Нгуен Чонг Чык

Термонапряженное состояние приконтактной зоны возводимого бетонного массива 1483

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

М.Д. Стрелкова, К.И. Стрелец, В.З. Величкин, М.В. Петроченко

**Эффективность применения сборно-монолитных
 каркасных систем в гражданском строительстве 1493**

С.Б. Сборычиков, П.А. Журавлев

Структура и состав реинжиниринга застройки 1508

Требования к оформлению научной статьи 1520

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Paria Ildarabadi, Samaneh Asadi, Ilkhomzhon S. Shukurov

The orientation of residential development in Mashhad that takes account of daylight 1419

Svetlana V. Privezentseva, Sergey I. Pichugin

A system approach to calculating the width of pedestrian communications in transportation hubs 1430

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

Ivan S. Aksenov, Aleksandr P. Konstantinov

An analytical method for calculating the stress-strain state of PVC window profiles under thermal loading 1437

Konstantin N. Makarov, Elena E. Yurchenko, Eric K. Biryukbaev, Vasilisa E. Yurchenko

A study on resonance characteristics of hydraulic structures and buildings conducted using small-size models 1452

Vitaly I. Kolchunov, Pavel A. Korenkov, Phan Dinh Quoc

A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts 1462

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Irina N. Maksimova, Irina V. Erofeeva, Victor V. Afonin, Denis V. Emelyanov

Using interpolation and correlation to evaluate the quality of cement composites exposed to a thermally aggressive environment 1473

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Nikolai A. Aniskin, Nguyen Trong Chuc

The thermal stress state arising in the contact area of mass concrete during construction 1483

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Mariia D. Strelkova, Ksenia I. Strelets, Victor Z. Velichkin, Marina V. Petrochenko

The application efficiency of precast monolithic frame systems in civil engineering 1493

Sergej B. Sborshchikov, Pavel A. Zhuravlev

The reengineering of built-up areas: structure and composition 1508

Requirements for research paper design 1520

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 711:628.92(55)

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1419-1429

The orientation of residential development in Mashhad that takes account of daylight

Paria Ildarabadi¹, Samaneh Asadi², Ilkhomzhon S. Shukurov²

¹ Mashhad branch of the Islamic Azad University; Mashhad, Iran;

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

ABSTRACT

Introduction. Due to population growth and urbanisation, energy consumption by urban buildings, especially in developing countries, is increasing dramatically. Limited energy resources and the need to save on consumption necessitate the optimal design in the field of residential development. Building walls are an important boundary between indoor and outdoor spaces, since daylight has a direct impact on energy consumption in buildings. The optimal use of daylight in living spaces reduces energy consumption dramatically. In this regard, the proper orientation of residential buildings is an effective method of energy consumption optimisation. If the layout of an urban development fits the climate of a region, residential buildings are constructed with account taken of the optimal orientation to daylighting.

Materials and methods. The aim of this study is the optimal orientation of a part of residential development in Mashhad. To achieve the goal of the study, comprehensive studies of the city of Mashhad and its environs were conducted and Mashhad climate data were collected. Hence, daylight scattering was analysed for a given area with regard to the optimal angle of orientation to daylighting. Daylight was analysed in the two modes, including the present-day layout and the angular position (the north side), that were compared later. The study area has the angle of 20 degrees from the north to the west. All analyses and simulations were performed on the longest (June 22) and shortest (December 22) days of the year using parametric software programmes Grasshopper and Ladybug.

Results. A comparative analysis of the two modes shows that the study area, located in the north, receives more daylight, regardless of the angle of rotation. Mashhad summers are hot and dry, and winters are cold and humid; a lot of light can penetrate into buildings during the hot season. In winter, overshadowing by buildings does not allow enough daylight due to the unfavourable location of the residential development. According to the standard, the optimal rotation angle of buildings in Mashhad varies from 5 degrees northeast to 20 degrees northwest.

Conclusions. The results show that the optimal daylight orientation in Mashhad is 20 degrees southeast. This value is in the standard range for the residential orientation, and the amount of light, received in summer and winter seasons, is proportional to the needs of indoor space users; natural lighting makes residential spaces more comfortable and reduces energy consumption.

KEYWORDS: habitation, residential development, urban planning, residential area orientation, daylight, optimal angle, radiation angle, optimisation, energy

FOR CITATION: Ildarabadi P., Asadi S., Shukurov I.S. The orientation of residential development in Mashhad that takes account of daylight. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1419-1429. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1419-1429

Corresponding author: Samaneh Asadi, samaneasadi2018@gmail.com.

Региональная ориентация в жилой застройке Мешхеда с учетом дневного света

Пария Ильдарабadi¹, Саманех Асади², Ильхомжон Садриевич Шукуров²

¹ Мешхедский филиал Исламского университета Азад; г. Мешхед, Иран;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Из-за роста населения и урбанизации потребление энергии в городских зданиях, особенно в развивающихся странах, возрастает. Оптимальное использование дневного света в жилых помещениях резко снижает потребление энергии, поэтому актуальна правильная ориентация жилых районов.

Материалы и методы. Рассмотрена информация о городе Мешхед, климатических условиях. Анализировалось рассеяние дневного света в двух режимах текущего состояния и углового положения (северная сторона) и сравнение. Область исследования имеет угол 20 градусов с севера на запад. Все анализы и моделирование выполнялись параметрическими программами Grasshopper и Ladybug в самый длинный день года (22 июня) и самый короткий день в году (22 декабря).

Результаты. Сравнительный анализ между двумя режимами позволил установить, что исследуемая область получает больше дневного света, независимо от угла поворота, находясь на севере. Поскольку в Мешхеде жаркое и сухое лето, холодная и влажная зима, в жаркое время года в здания попадает много света. Из-за неблагоприятного расположения региона зимой тень от построек не позволяет получать достаточное количество дневного света. Согласно стандарту, оптимальный угол поворота зданий в Мешхеде составляет от 5 градусов к северо-востоку до 20 градусов к северо-западу.

Выводы. Результаты показывают, что оптимальная дневная ориентация в Мешхеде 20 градусов к юго-востоку. Это количество находится в стандартном диапазоне жилой ориентации, а количество света, получаемого летом и зимой, пропорционально потребностям пользователей пространства, что повышает комфорт жителей и снижает потребление энергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жилье, жилая застройка, градостроительство, региональная ориентация, дневной свет, оптимальный угол, угол излучения, оптимизация, энергия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильдарабди П., Асади С., Шукуров И.С. The orientation of residential development in Mashhad that takes account of daylight // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1419–1429. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1419-1429

Автор, ответственный за переписку: Саманех Асади, samaneasadi2018@gmail.com.

INTRODUCTION

A growing trend towards urbanisation and urban texture development has changed the form of a city. Urban areas featuring extensive changes in design and architecture have triggered more complex micro-climatic conditions that affect the energy performance of buildings and bioclimatic design strategies as well as numerous engineering applications. Urban morphology can reduce wind speed by 27 % and boost air temperature by more than 14 % [1]. Also, optimised urban morphology can reduce the levelled cost of energy infrastructure by up to 30 % [2]. Urban development can effectively create a surface heating environment, so that a decrease or an increase in surface heat is closely related to old and new urban areas. A difference between the height of buildings and the geometry of a site is an important indicator in this regard [3]. The improper use of non-renewable energy sources has boosted greenhouse gas emissions, thermal islands in cities, global warming and energy consumption. Given these threats to Earth today, the construction industry is looking at conditions to erect buildings featuring lower energy consumption. Therefore, a set of requirements has been collected to reduce energy consumption by, at least, 32.5 % by 2030 (this amount is considered in comparison with the “business as usual” scenario) [4].

Urban energy studies demonstrate an increasing trend towards the identification of urban design variables and parameters describing the energy performance of buildings [5]. Several factors in different areas of construction can play an important role in reducing energy consumption by a building. Urban morphology coupled with a concept of climatic diversity, or altitude diversity in urban morphology, is a factor influencing optimisation [6]. Due to their complex structure, urban and regional designs should ensure the effective use of resources in a living environment, as well as socio-economic and environmental values for residents [7]. The need for a sustainable approach to urban space management is increasingly felt in urban planning. This approach entails the need for new space-focused decision-making tools and techniques [8]. Urban geometry has remained unchanged for many years, and this uniformity of geometry has a significant impact on the energy performance of buildings and the urban climate. Given the complex

structure of cities, urban design must ensure the efficient use of resources in the production of high-quality living environments (with regard to their economic, social and environmental value), which requires multiple decisions. In particular, the separation of design parameters at the urban level and other activities, that affect the energy performance of a building, are complex undertakings [9]. The shape of future urban areas should not be determined by the technologies of the past, but by the technologies of the future [10]. Urban form is a factor that affects the ultimate energy performance of a building, and potentially more than 10 % of energy consumption depends on urban form¹. Shading effects can also effectively optimise daylight in terms of the amount of light, entering an urban space, and save energy. Since it is difficult to calculate optimal insolation at the initial design stage, building retraction curves and patterns of an urban space structure are evaluated for the optimal solar energy [11]. The use of simulation and optimization tools on an urban scale can be a way to use technology that can measure all aspects and select the most optimal solution.

REVIEW OF PAST RESEARCH

Taleghani and the co-researchers focus on the effect of direction and energy balance in a microclimate [12]. In this study, computer simulations are used to cool building facades on the longest day of a year (June 21). The results of the study show that east- and west-facing facades have the greatest effect on energy consumption, whereas north- and south-facing building walls have little effect on energy consumption, and they should focus on cooling east and west-facing facades. In the study, conducted by Farhadi and the team, various strategies were implemented to achieve thermal comfort [13]. The greatest impact on comfort and heat is made by the building orientation that has the value of 1.69 °C. A change in urban shape and optimal orientation will improve parameters related to thermal comfort. In some cases, urban morphology is effective in terms of climate conditions and thermal comfort. In the research, conducted by Chatzidimitriou and Yannas [14], different street configurations in a dense ur-

¹ Chapter 9. Energy Efficiency in Building Renovation: handbook of Energy Efficiency in Buildings / by ed. F. Asdrubali, U. Desideri. Butterworth-Heinemann, 2019. Pp. 675–810.

ban area were simulated and evaluated. The results of this study show that urban geometries, formed by combining climate parameters, create the most favourable conditions for comfort and heat. Han and his research team have introduced the notions of concept, technology and management as the three main dimensions of cognitive development of urban design [15]. This study is the basis for the practical focus of urban design and a platform for communication between people. It can also help to better understand the development of urban design and its concepts so that it can identify the goal and recognise the value of different types of urban design. One of the urban development strategies is a combination of height, distance and orientation of urban fabric that can always maintain the desired ambient temperature. This method is proposed in a study, conducted by Trepici who suggests using shading between buildings and cutting energy consumption [16]. In a study by Albatayneh [17], the effect of orientation of insulated cavity brickwork on thermal performance is investigated. The results of this study show that in the southern hemisphere, north-facing windows can most optimally use winter sunlight. This orientation minimises heat loss in winter and improves heat performance by, at least, three times. In the study by Ebrahimi-Moghadam [18], a residential building with inappropriate orientation is evaluated. The Light Shelves technology is employed to control the light, entering the residential space. The analysis of building orientation and dimensions of its openings was performed using three skylights facing east, south and west. In the west and east, light shelves were able to control the entry of sunlight to some extent due to the inappropriate orientation of the building. The total optimized energy consumption (heating, cooling and electricity) reaches 80,162 kWh/m².

Based on the reviewed literature, research has been conducted on the optimal orientation of urban areas and buildings to improve indoor thermal comfort and save energy. Efficient energy control is a prerequisite for urban and building design, and it has a great impact on reducing energy consumption. The study also focuses on the climate parameter of daylight. In summary, the core points of this research can be presented as follows:

- the effect of sunlight in the study area;
- using software analysis to achieve optimal orientation;
- achieving a single pattern for buildings in the study area to provide comfort and heat to people and reduce energy consumption.

MATERIALS AND METHODS

In this part of the study, simulation and modelling techniques are presented and information on the case study is provided.

The problem statement and research tools

The proper orientation of buildings is a way to optimize energy consumption on the urban and regional scale. Hence, if urban and regional contexts are respon-

sive to the local climate and applicable criteria, the orientation of buildings will be adequate, indoor thermal comfort will improve, while energy consumption will go down. The effect of daylight on energy consumption and orientation is one of the most important issues to be considered. This study addresses sunlight with regard to the climate and texture of the region and presents the appropriate orientation angle for the study area. The sample residential development area is modelled by the Grasshopper parametric software and simulations are performed by Ladybug plugins to achieve the objectives of this study in addition to studying the local area².

Mashhad City as the case study

In this study, a residential area in the city of Mashhad, Iran, is evaluated. Fig. 1 shows Mashhad, which is located in the northeast of Iran and has an area of 351 square kilometres. Mashhad is the second largest city in Iran after Tehran. The city of Mashhad has a longitude of 59 degrees and 15 minutes to 60 degrees and 36 minutes, a latitude of 35 degrees and 43 minutes to 37 degrees and 8 minutes and an altitude of about 1,050 meters (maximum 1,150 meters and minimum 950 meters). As shown in Fig. 2, the city welcomes over 27 million pilgrims each year, two million arrive from abroad due to the presence of the shrine of Ali ibn Musa al-Reza, the eighth Imam of the Shiite religion. The population density in Mashhad exceeds nine thousand tons per square kilometer^{3, 4, 5}.

² Modelling by the Grasshopper software, analysis by Ladybug plugin in the Grasshopper software.

³ EPW file and stat file, Mashhad city, 2020.

⁴ AccuWeather. Mashhad, Razavi Khorasan. URL: <https://www.accuweather.com/en/ir/mashhad/209737/daily-weather-forecast/209737>

⁵ Weather History Download Mashhad. URL: https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/export/mashhad_iran_124665



Fig. 1. Location of Mashhad, Iran



Fig. 2. Mashhad city view

The climate of Mashhad

Several climate fronts interfere in Mashhad due to its geographical position. A part of Mashhad has a cold and dry climate, another part of the city has a semi-arid and cold climate and some city districts are located in the Binalood mountains and Hezar Masjid with their cold humid climate. Generally, Mashhad city has hot and dry summers, while its winters are cold and wet. In summer, the maximum average temperature varies between 35 and 40 °C, while the minimum average winter temperature is down to –5 °C. The average humidity is 54.4 % in Mashhad, and the average annual minimum and maximum humidity values are 36.5 % in July and 71.9 % in January, respectively. The relative humidity chart of Mashhad says that the percentage of humidity

is inversely proportional to the air temperature, and evaporation increases while relative humidity goes down. The relative lack of humidity in Mashhad makes it easier to tolerate summer heat. Water coolers can be used to reduced indoor temperature. The major rainfall is in March and April in Mashhad^{6,7}.

An accurate climate analysis from different perspectives requires a comprehensive model of prevailing climatic conditions. For this purpose, it is necessary to accurately model various parameters related to

⁶ Energy-Models. URL: https://energy-models.com/search/apachesolr_search/mashhad

⁷ Weather History Download Mashhad. URL: https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/export/mashhad_iran_124665

Monthly average weather data for Mashhad city. Iran [20]

Monthly Means	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Unit.
Global Horiz. Radiation (Avg. Hourly)	255	314	401	470	519	547	555	527	487	389	271	244	Wm ²
Direct Normal Radiation (Avg. Hourly)	2446	314	370	382	488	485	509	513	489	423	309	271	Wh/m ²
Diffuse Radiation (Avg. Hourly)	148	154	173	203	184	176	168	152	159	140	127	132	Wh/m ²
Global Horiz. Radiation (Max Hourly)	562	698	873	959	988	1028	1023	953	922	768	622	490	Wh/m ²
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	721	822	865	852	859	854	846	846	858	852	843	754	Wh/m ²

Continuation of the Table

Diffuse Radiation (Max Hourly)	285	399	448	492	458	498	354	372	422	362	337	275	Wh/m ²
Global Horiz. Radiation (Avg. Daily Total)	2,511	3,331	4,745	6,105	7,252	7,891	7,880	7,036	5,958	4,302	2,730	2,336	Wh/m ²
Direct Normal Radiation (Avg. Daily Total)	2,431	3,302	4,385	4,972	6,264	6,997	7,227	6,851	5,976	4,782	3,113	2,602	Wh/m ²
Diffuse Radiation (Avg. Daily Total)	1,459	1,643	2,052	2,633	2,571	2,541	2,387	2,033	1,949	1,546	1,288	1,270	Wh/m ²
Global Horiz. Illumination (Avg. Hourly)	28,611	36,144	46,769	55,019	61,746	65,551	66,757	63,380	57,867	45,611	31,134	27,532	lux
Direct Normal Illumination (Avg. Hourly)	17,626	21,865	26,488	29,006	31,585	34,896	36,724	34,856	35,170	29,413	19,784	17,766	lux
Dry Bulb Temperature (Avg. Monthly)	2	5	11	17	21	26	28	26	22	15	8	3	°C
Dew Point Temperature (Avg. Monthly)	-1	0	2	3	8	3	2	7	-1	2	0	0	°C
Relative Humidity (Avg. Monthly)	72	74	61	44	48	25	21	32	23	46	64	74	%
Wind Direction (Monthly Mode)	120	180	120	120	120	60	90	120	120	180	120	100	degrees
Wind Speed (Avg. Monthly)	1	2	2	1	2	3	2	2	2	1	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg. Monthly of 3 Depths)	7	7	10	13	18	22	24	23	20	16	12	8	°C

solar energy, wind and humidity. In this research, dynamic modelling of weather conditions as monthly data of Mashhad is presented in Table.

A case study

The selected area is located in the residential development area of Mashhad. As shown in Fig. 3,

the city of Mashhad is divided into 4 general areas featuring obsolete texture, middle time texture, new urban texture and developing texture. In the context of residential development, the development path has been shown to be modularly designed. In this study, the correct orientation of the area is evaluated. Fig. 4 shows buildings in the study area.

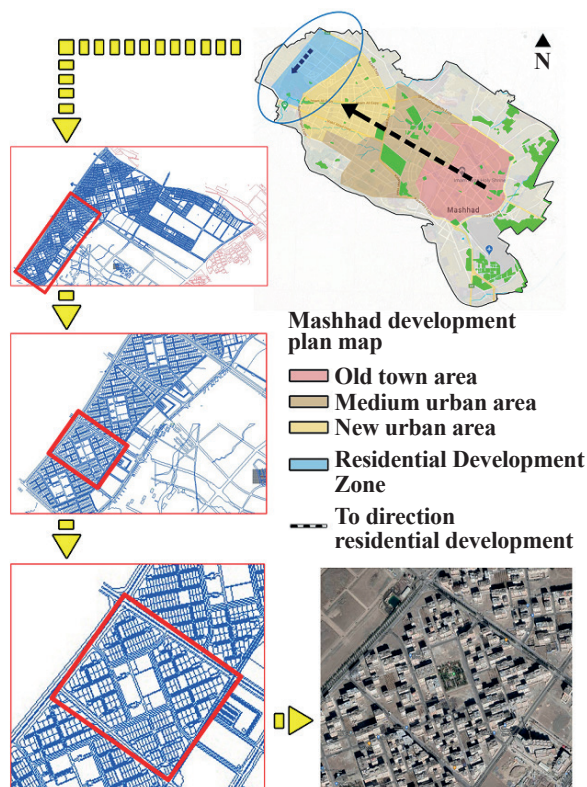


Fig. 3. The scope of the study

Analysis and evaluation

An important factor that has a direct effect on daylight scattering and energy consumption in residential areas is attention to shading. Shading between buildings with an emphasis on orientation, geometry and urban layout patterns affects energy performance and user comfort. The integrated effect of height, distance and orientation of the urban fabric can substantially reduce energy demand [19]. This section addresses the systematic evaluation of the impact produced by developing urban textures on the amount of daylight received in Mashhad. First, the site is modelled, then the appropriate orientation is evaluated against the pre-set criteria and the optimal angle standard for Mashhad, and after that daylight scattering and building shading are analysed.



Fig. 4. Buildings in the study area

Modelling

The study area, located in Mashhad, was modelled by the software, and its daylight was analysed to investigate the optimal orientation of buildings. Fig. 5 shows the texture and model of the study area. Solar diagrams are shown in Fig. 6 to clarify the analysis of lighting. The range from +3 to -3 is comfortable for people, and it varies from the highest to the lowest temperature, respectively. Comfort equilibrium conditions range from 0 to +3 in terms of heat, and from 0 to -3 in terms of cold. The optimal temperature equilibrium ranges between +0.5 to -0.5^{8, 9, 10}. Comfortable conditions are only established for some months of the year.

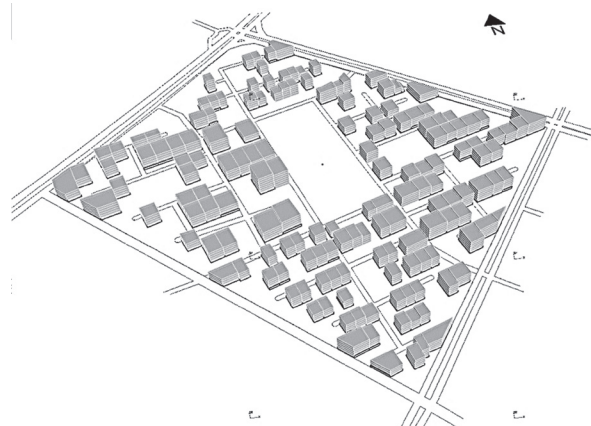


Fig. 5. Three-dimensional modelling of the study area

RESEARCH RESULTS

Analysis

Orientation analysis of the site

The optimal orientation angle for buildings in the south-eastern city of Mashhad is between 5 degrees north to east, to 20 degrees north to west, since it ensures the best lighting [20]. Fig. 7 shows the general view of optimal orientation, and the hatched area is the optimal orientation range. Hence, the orientation of the site has also been examined. As Fig. 8 shows, the orientation angle of the study site is 20 degrees from north to west.

Daylight in the study area

In this section of the study the effect of daylight scattering on the study site has been examined. In the current situation, the study site has an angle of 20 degrees from north to the side. Then the daylight scattering was analysed more accurately outside the optimal range (Fig. 9). All daylight analyses were performed on an hourly basis (the number of daylight hours) in

⁸ ASHRAE. URL: <https://www.ashrae.org>

⁹ ANSI/ASHRAE, Standard 55, approved by ASHRAE and the American National Standards Institute on January 29, 2021.

¹⁰ ASHRAE 90.1, ASHRAE Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2019.

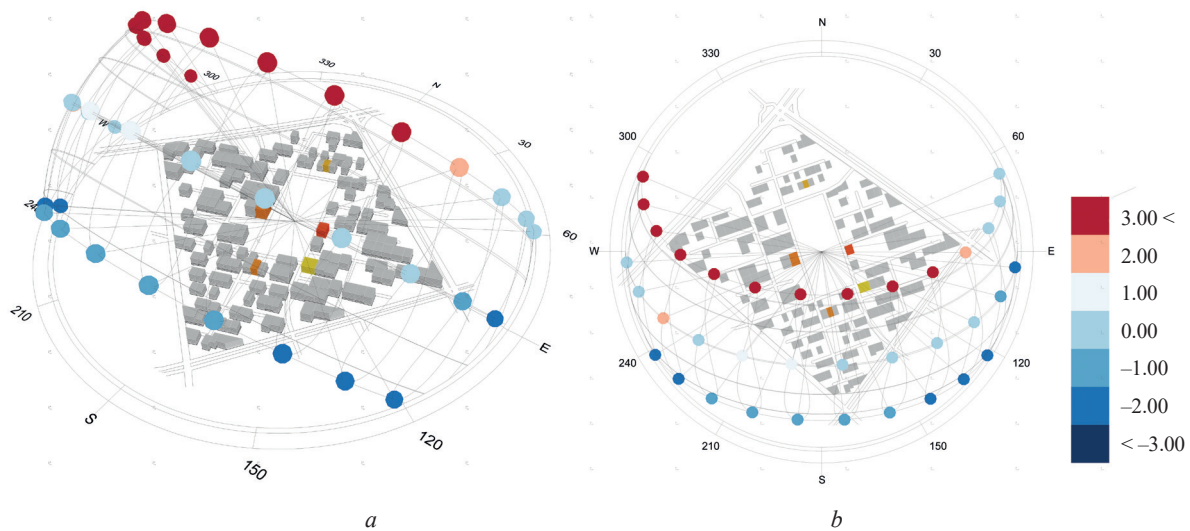


Fig. 6. Solar diagram perspective (a); solar diagram plan on the site under review (b)

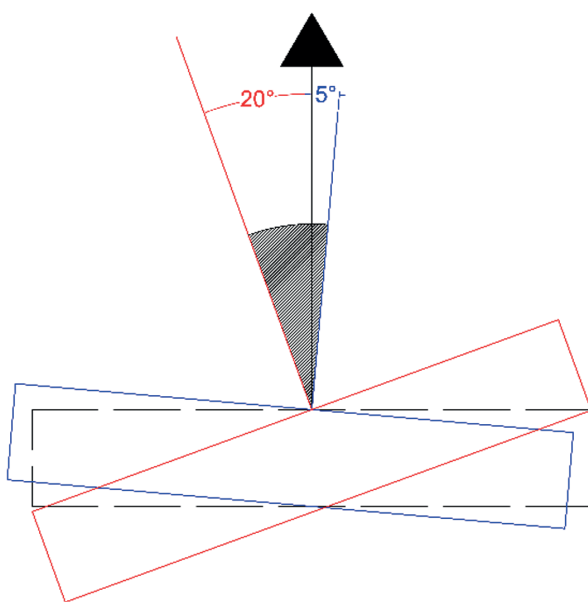


Fig. 7. The optimal orientation angle in Mashhad is between 5 degrees north to east, to 20 degrees north to west

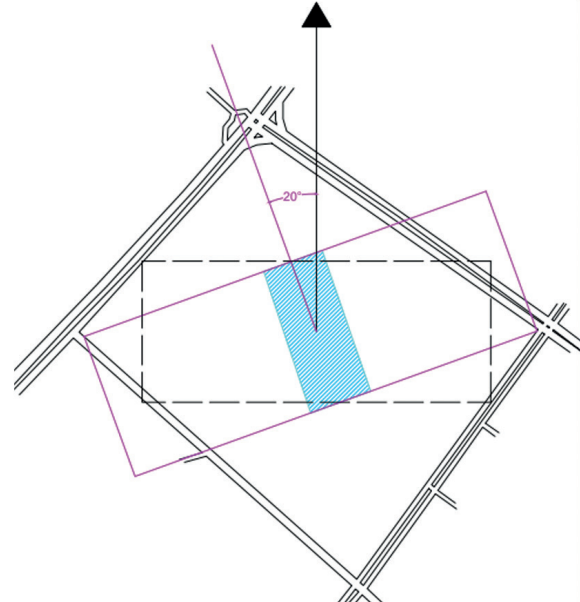


Fig. 8. The orientation angle on the site under study

the course of the two days, the longest and shortest days of the year. Fig. 10 and 11 show daylight scattering of in the current situation and if the site is relocated in the northward direction. Two options of daylight scattering are presented in Fig. 10 and 11.

Fig. 12 shows a comparison of positions on June 22, the longest day of the year. The city of Mashhad should reduce daylight reception on June 22 because it has hot and dry summers. The analysis of June 22 shows that if the site is oriented northward, daylight scattering is higher than if the site orientation has the angle of 20 degrees. A comparison of shading shows that due to the solar conveyor, the direction of radiation in the orientation position of 20 degrees causes shading by buildings. However the northward orientation does not create significant shading, because the amount of light is smaller due to the sunlight angle in the summer season.

Fig. 13 presents a comparison of the site lighting in the two positions. The city of Mashhad must re-

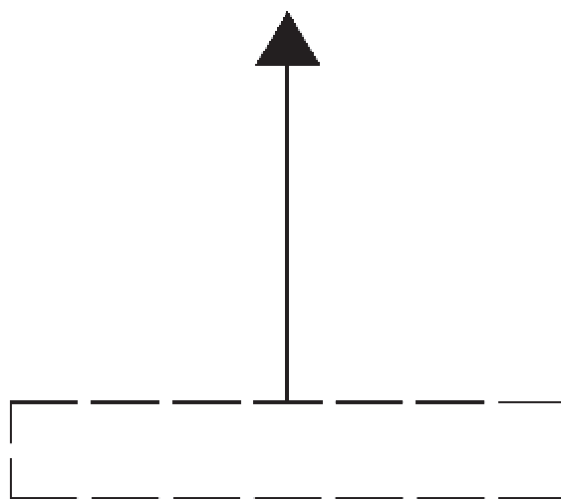


Fig. 9. The site that has no orientation

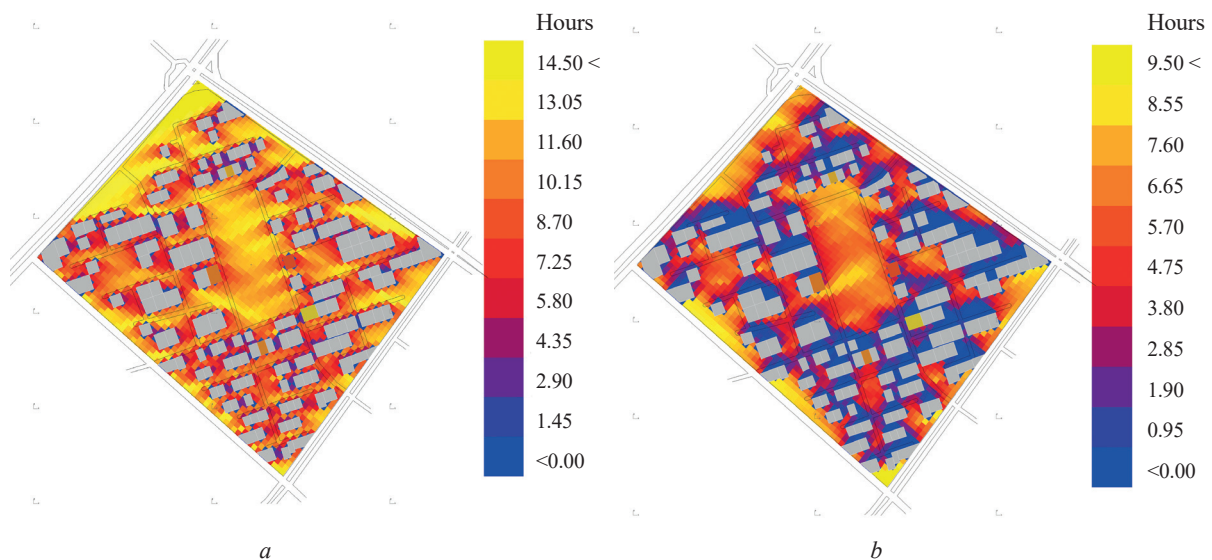


Fig. 10. Daylight received in the current position, at the angle of 20 degrees from north to west: daylight analysis on June 22, the longest day of the year (a); daylight analysis on December 22, the shortest day of the year (b)

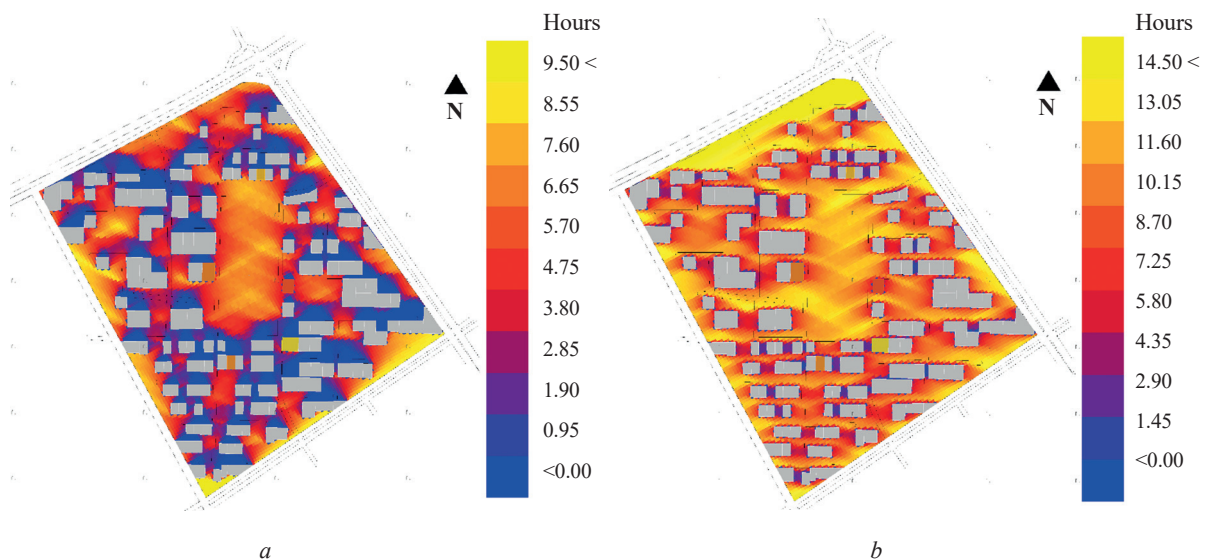


Fig. 11. Daylight examination in the northward rotation position of the site, at the 0 degrees angle: daylight analysis on June 22, the longest day of the year (a); daylight analysis on December 22, the shortest day of the year (b)

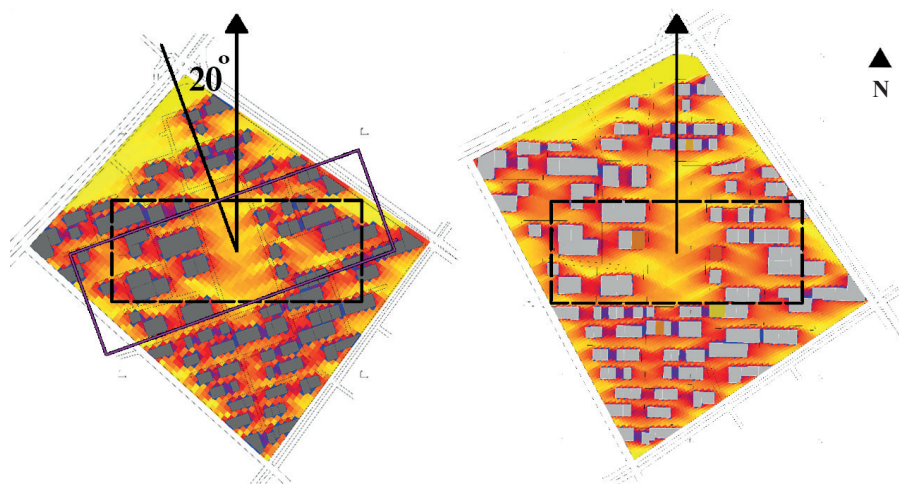


Fig. 12. Comparative daylight analysis for the two cases as of June 22: northward direction (right); the angle of 20 degrees from north to west (current position) (left)

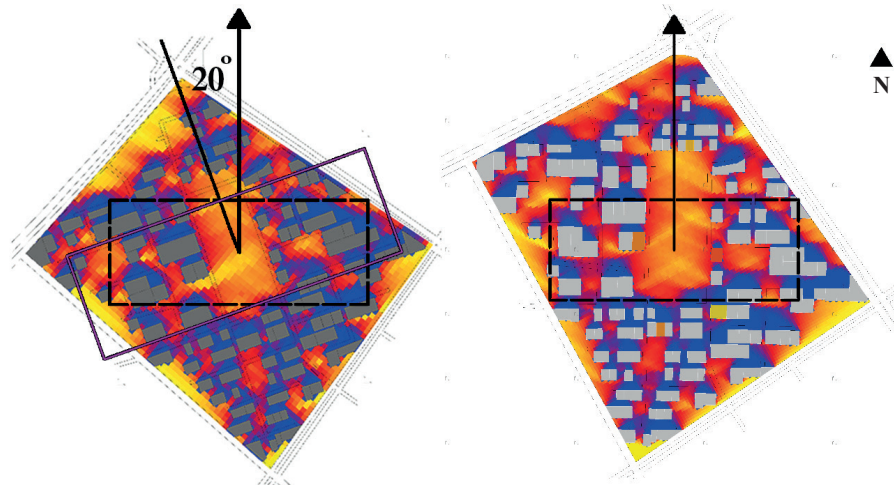


Fig. 13. Comparative daylight analysis for the two cases as of December 22: northward direction (right); the angle of 20 degrees from north to west (current position) (left)

ceive maximum daylight on December 22, because it has cold and wet winters. Daylight analysis, conducted on December 22, shows that the site receives maximum daylight if it has a 20 degrees orientation relative to the north. A comparison of the two positions in terms of shading also shows that shading occurs in the position of 20 degrees site because of the angle of sunlight in winter.

Fig. 14 has an overview of the optimal site orientation. Given the orientation of the residential development area and its optimal lighting, the site must be split into four parts *C*, *D*, *A* and *B*. The optimal orientation angle of the study site is 20 degrees from the north to west to ensure the optimal lighting of its four parts:

- part *C* receives the best lighting compared to other parts: southeast, south and southwest light;
- part *D* receives east and southeast light;
- part *A* receives northeast, north and northwest light;
- part *B* receives west and northwest light after parts *C*, *D* and *A*.

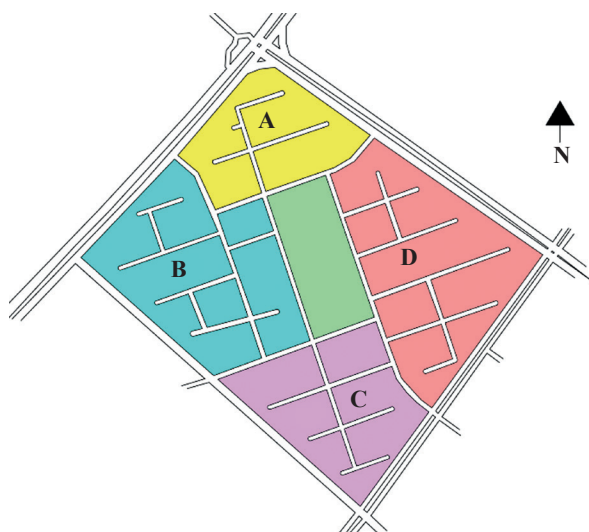


Fig. 14. General site segmentation framework

CONCLUSION AND DISCUSSION

This study addresses the natural lighting of a residential development area in Mashhad with the aim of investigating the proper orientation of the urban space. The basis of the study is the orientation of buildings and daylight. The optimal angle range in the city of Mashhad is between 15 and 30 degrees from north to west; studies have been conducted for the two angles of the site position. To attain the research objectives at the first stage, the city of Mashhad was studied from different aspects: part of the residential development area was modelled using Grasshopper parametric software and then the daylight behaviour was analysed. Withdrawals were made for the two days, the longest (June 22) and the shortest (December 22) days of the year. The research shows that:

- the study area has an angle of 20 degrees from north to west, which is in the optimal angle range (between 15 to 30 degrees north to west). Therefore, the study area is suitably positioned;
- to ensure the best environment in terms of human comfort, it is necessary to control the lighting of the residential area; hence, by placing the residential area at an optimal angle, one can largely control its lighting;
- the location of the study site at an angle of 20 degrees from north to west entails minimum and maximum site lighting in summer and in winter;
- the orientation of the study area at of 20 degrees from north to west scatters daylight so that in summer the area is shaded by buildings, and in winter the area is shaded by the Serat building, and it is acceptable;
- the space between the parts is the turning point of the site, which features the traditional architecture of Iran and the central courtyard, and it represents a green area between residential complexes. In addition to the optimal orientation angle, attention was

drawn to creating green spaces and good site weather conditions.

Intensive construction, high construction density and taller buildings in residential spaces change the form and geometry of the site. The effect of orien-

tation in residential areas on their optimal lighting is a main factor that boosts comfort and indoor temperature. The residential development area of Mashhad is well-oriented in terms of lighting and daylight scattering during the year.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Javanroodi K., Nik M. Impacts of microclimate conditions on the energy performance of buildings in urban areas. *Buildings*. 2019; 9(8):189. DOI: 10.3390/buildings9080189
2. Perera A.T.D., Javanroodi K., Nik V.M. Climate resilient interconnected infrastructure: Co-optimization of energy systems and urban morphology. *Applied Energy*. 2021; 285:116430. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116430
3. Liu H., Huang B., Gao S., Wang J., Yang C., Li R. Impacts of the evolving urban development on intra-urban surface thermal environment: Evidence from 323 Chinese cities. *Science of The Total Environment*. 2021; 771:144810. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144810
4. Bisegna F., Cirrincione L., Casto B.M.L., Peri G., Rizzo G., Scaccianoce G. et al. Fostering the energy efficiency through the energy savings: the case of the University of Palermo. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2019. DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783774
5. Javanroodi K., Mahdavinejad M., Nik V.M. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*. 2018; 231:714-746. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.116
6. Liu L., Liu J., Jin L., Liu L., Gao Y., Pan X. Climate-conscious spatial morphology optimization strategy using a method combining local climate zone parameterization concept and urban canopy layer model. *Building and Environment*. 2020; 185:107301. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107301
7. Shareef S. The impact of urban morphology and building's height diversity on energy consumption at urban scale. The case study of Dubai. *Building and Environment*. 2021; 194:107675. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107675
8. Ramyar R. Social-ecological mapping of urban landscapes: Challenges and perspectives on ecosystem services in Mashhad, Iran. *Habitat International*. 2019; 92:102043. DOI: 10.1016/j.habitatint.2019.102043
9. Mangan S.D., Oral G.K., Kocagil I.E., Sozen I. The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101626. DOI: 10.1016/j.job.2020.101626
10. Ahmadian E., Byrd H., Sodagar B., Matthewman S., Kenney C., Mills G. Energy and the form of ci-
- ties: the counterintuitive impact of disruptive technologies. *Architectural Science Review*. 2019; 62(2):145-151. DOI: 10.1080/00038628.2018.1535422
11. Jayaweera N., Rajapaksha U., Manthilake I. A parametric approach to optimize solar access for energy efficiency in high-rise residential buildings in dense urban tropics. *Solar Energy*. 2021; 220:187-203. DOI: 10.1016/j.solener.2021.02.054
12. Taleghani M., Swan W., Johansson E., Ji Y. Urban cooling: Which façade orientation has the most impact on a microclimate? *Sustainable Cities and Society*. 2020; 64:102547. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102547
13. Farhadi H., Faizi M., Sanaieian H. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 46:101448. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101448
14. Chatzidimitriou A., Yannas S. Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*. 2017; 33:85-101. DOI: 10.1016/j.scs.2017.05.019
15. Han D., Song Y., Wang E., Liu H., Fang R. Multiple dimensions of urban design development from a practice perspective: A case study of an institute in Nanjing. *Frontiers of Architectural Research*. 2021; 10(1):79-91. DOI: 10.1016/j.foar.2020.11.005
16. Trepci E., Maghelal P., Azar E. Urban built context as a passive cooling strategy for buildings in hot climate. *Energy and Buildings*. 2021; 231:110606. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110606
17. Albatayneh A.M., Alterman D., Page A., Moghtaderi B. The significance of the orientation on the overall buildings thermal performance-case study in Australia. *Energy Procedia*. 2018; 152:372-377. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.159
18. Ebrahimi-Moghadam A., Ildarabadi P., Aliakbari K., Fadaee F. Sensitivity analysis and multi-objective optimization of energy consumption and thermal comfort by using interior light shelves in residential buildings. *Renewable Energy*. 2020; 159(1-3):736-755. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.127
19. Ebrahimi-Moghadam A., Ildarabadi P., Aliakbari K., Arabkoohsar A. Performance analysis of light shelves in providing visual and thermal comfort and energy savings in residential buildings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020; 42(9):484. DOI: 10.1007/s40430-020-02565-2

20. Behzadianmehr A., Alijani B., Rahnama M.R. Climate design and determination of the optimal orientation of buildings and streets with respect to radiation in Mashhad. *Journal of Geography and Regional Development*. 2018; 15(2):197-216. DOI: 10.22067/GEOGRAPHY.V15I2.65172

Received July 15, 2021.

Adopted in revised form on November 13, 2021.

Approved for publication on November 13, 2021.

B I O N O T E S : **Paria Ildarabadi** — postgraduate of the Department of Architecture; **Mashhad branch of the Islamic Azad University**; Mashhad, Iran; paria.ildarabadi@yahoo.com;

Samaneh Asadi — postgraduate of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

Ilkhomzhon S. Shukurov — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru.

Contribution of the authors: All authors contributed equally to the writing of the article.

The authors declare no conflicts of interest.

Поступила в редакцию 15 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 13 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 13 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Пария Ильдарабади** — аспирант кафедры архитектуры; **Мешхедский филиал Исламского университета Азад**; Хорасан-Резави, г. Мешхед, Иран; paria.ildarabadi@yahoo.com;

Саманех Асади — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru;

Ильхомжон Садриевич Шукуров — доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Системный подход в расчете ширины пешеходных коммуникаций в транспортно-пересадочных узлах

Светлана Вячеславовна Привезенцева¹, Сергей Игоревич Пичугин²

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

² *Аксиома; г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Пешеходные коммуникации — не единичная (элементарная) сущность, это, в первую очередь, совокупность элементов, которые связаны между собой, взаимодействуют между собой и внешней средой, имеют одну общую цель и измеримый результат, ширину. Будь это крупный транспортно-пересадочный узел (ТПУ) или небольшой остановочный пункт городского наземного пассажирского транспорта, даже тропинка вдоль дороги, необходимо учитывать три основных правила формирования объемно-планировочного решения: безопасность, комфортность и возможность доступа. Пешеходные коммуникации — совокупность элементов и обладают параметрами, которые служат результатами правильной организации, т.е. являются системой. Подход к изучению, управлению, созданию и развитию пешеходных коммуникаций должен быть как к системе. Цель методики — разработать порядок расчета основного параметра пешеходной коммуникации — ее общей ширины b , м, а также определить условия перехода между различными видами пешеходных коммуникаций.

Материалы и методы. Системный подход позволяет представить одну сложную задачу совокупностью более простых задач, которые решаются быстрее и легче с помощью математического моделирования.

Результаты. Благодаря методам математического моделирования разработан порядок расчета основного параметра пешеходной коммуникации — ширины, с учетом включения в пешеходный поток маломобильных групп населения (МГН).

Выводы. Если пешеходные коммуникации работают без изменений, а ТПУ при этом набирает пропускную способность, то рано или поздно он будет неэффективен. От формирования пешеходных коммуникаций зависит безопасность населения, а следовательно, и эффективность работы ТПУ. Для обеспечения безопасных, комфортных условий функционирования ТПУ требуется учитывать МГН при формировании пешеходных коммуникаций. Данный алгоритм можно применять и для расчета других направленных линейных пешеходных пространств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система, результат, транспортно-пересадочный узел, пешеходные коммуникации, маломобильные группы населения

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующей кафедрой градостроительства Н.В. Данилиной и сотрудникам кафедры, анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Привезенцева С.В., Пичугин С.И. Системный подход в расчете ширины пешеходных коммуникаций в транспортно-пересадочных узлах // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1430–1436. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1430-1436

Автор, ответственный за переписку: Светлана Вячеславовна Привезенцева, eldevendeesen@gmail.com, PrivezentsevaSV@mgsu.ru.

A system approach to calculating the width of pedestrian communications in transportation hubs

Svetlana V. Privezentseva¹, Sergey I. Pichugin²

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

² *Axiom; Saint-Petersburg, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Pedestrian communications are not a single (elementary) entity; first, they are a set of elements that are interconnected, interact with each other and the external environment, have one common goal and measurable result, that is, width. Moreover, whether it is a large transport hub, a small stopping point within a land-based urban passenger transport system, or even a pedestrian path along a motor road, its space-planning solution must comply with three basic rules. They are safety, comfort and accessibility. Pedestrian communications are a set of elements whose parameters result from the proper process organization, or represent a system. The approach to the study, management, creation and development of pedestrian communications must be akin to the one applicable to a system. The purpose of the method is to develop a procedure for calculating the main parameter of pedestrian communications — its total width b , in meters, and identify the conditions for a transition between various types of pedestrian communications.

Materials and methods. The system approach allows to represent one complex problem as a set of simple problems that are solved faster and easier using mathematical modelling.

Results. Thanks to mathematical modelling, a procedure was developed for calculating the main parameter of pedestrian communications, that is, width, with regard for low-mobility population groups in a pedestrian flow.

Conclusions. Low-mobility population groups must be addressed when pedestrian communications are designed to ensure the safe and comfortable operation of transport hubs. This algorithm can also be used to analyze other directed linear pedestrian spaces.

KEYWORDS: system, result, transport hub, pedestrian communications, low-mobility population groups

Acknowledgements. The co-authors are grateful to N.V. Danilina, head of the Urban Planning Department, its staff, and anonymous reviewers.

FOR CITATION: Privezentseva S.V., Pichugin S.I. A system approach to calculating the width of pedestrian communications in transportation hubs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11): 1430-1436. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1430-1436 (rus.).

Corresponding author: Svetlana V. Privezentseva, eledvendeesen@gmail.com, PrivezentsevaSV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для понимания сущности пешеходных коммуникаций есть более конструктивное и подходящее определение, приведенное в Своде знаний по управлению проектами (Project Management Body of Knowledge, PMBoK): система — совокупность интегрированных и регулярно взаимодействующих или взаимозависимых элементов, созданная для достижения определенных целей, причем отношения между элементами определены и устойчивы, а общая производительность или функциональность системы лучше, чем у простой суммы элементов [1].

Другими словами, система — это не просто множество или совокупность, это — упорядоченность и целостность, четкая структура [2], сопровождается определенной деятельностью и развитием, взаимодействует с внешней средой и должна иметь измеримый результат.

Научные работы доктора технических наук, профессора Д.Н. Власова внесли значительный вклад в отечественное исследование транспортно-пересадочных узлов (ТПУ). В них проработаны научно-методологические основы развития всей системы ТПУ [3], она рассматривается как самостоятельная и значимая часть транспортной инфраструктуры, разработаны классификация ТПУ, агломераций и имитационная модель системы — «транспортно-пересадочный узел» [4], требования и типовые планировочные схемы для создания документации по планировке территории пересадочных узлов [5].

Известны публикации в области людских потоков, их взаимодействия в условиях эвакуации, теории организации архитектурной и планировочной среды для людей с ограниченными возможностями, психологические, антропометрические и гендерные признаки движения людей в пешеходных потоках. Вопросам организации архитектурной и планировочной среды для маломобильных групп населения (МГН) посвящены работы С.В. Беляева, А.И. Милинского, В.В. Холщевникова [6], Ю.В. Алексеева [7], Д.А. Самошина [8, 9] и В.К. Степанова.

Большое количество научных трудов по эвакуации из зданий и сооружений написано в МЧС, но при этом, как и в работах В.М. Предтеченского [10, 11], не рассматривается спокойное движение МГН в пешеходном потоке, а разбираются экстремальные условия, связанные с эвакуацией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки порядка формирования планировочного решения пешеходных коммуникаций в ТПУ с учетом безопасного, комфортного передвижения всех групп населения, включая МГН [12], необходимо проанализировать все совокупности системы. Следует написать программу расчета ширины пешеходных коммуникаций в ТПУ, учитывая плотность и интенсивность пешеходного потока по разным типам пешеходных коммуникаций.

Цель организации пешеходных коммуникаций в ТПУ — создание нормативных условий движения для общего потока, принимая во внимание присутствие МГН:

- нормативные условия движения, оцениваемые количественными параметрами времени, плотности, скорости движения при заданных параметрах интенсивности и протяженности коммуникаций;
- комфорт и безопасность использования общественного пространства [13];
- свободный доступ к инфраструктуре ТПУ [14].

Система в нашем случае — транспортно-пересадочный узел, а подсистема — пешеходные коммуникации, включают конкретный набор понятий и характеристик, составляющих ее элементов.

Элемент — предел членения системы с точки зрения аспекта рассмотрения, решения конкретной задачи, поставленной цели [15].

Элементов, из которых состоит структура пешеходных коммуникаций, будет шесть — три основных и три внешних параметра (табл. 1).

Разработана методика расчета параметров пешеходных коммуникаций в ТПУ, основанная на следующих предположениях:

Табл. 1. Элементы структуры пешеходных коммуникаций в ТПУ и их внешние параметры

Table 1. Elements of the structure of pedestrian communications in a transport hub and their external parameters

Элементы Elements		
Ширина Width	Длина Length	Пешеходная составляющая Pedestrian component
Внешние параметры External parameters		
Экология и охрана природы Ecology and nature conservation	Художественный облик городской среды The artistic image of the urban environment	Функциональная обеспеченность и доступность The availability of functions and accessibility

• пешеходные коммуникации в ТПУ являются местом концентрации людей, двигающихся в определенном направлении с определенной целью;

• пешеходные коммуникации связывают части системы ТПУ и должны быть безопасными и комфортными для любой категории граждан;

• каждый человек должен иметь доступ к пешеходным коммуникациям и возможность пользоваться товарами и услугами.

Системный подход позволяет представить одну сложную задачу совокупностью более простых задач, которые решаются быстрее и легче с помощью математического моделирования.

Распределение N_i человек на участках формирования, имеющих ширину b_i и длину l_i , принимается равномерным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель методики — разработать порядок расчета основного параметра пешеходной коммуникации — ее общей ширины b , м, а также определить условия перехода между различными видами пешеходных коммуникаций, осуществляемых с помощью типов коммуникационных элементов: пандусов, спусков, и т.п. Разработанная методика состоит из трех этапов:

Первый этап — аналитический, включает анализ исходной информации по планировочному решению ТПУ как при реконструкции существующего решения, так и для выявления параметров проектируемого варианта. Основан на анализе пешеходных

коммуникаций ТПУ, построенного с применением метода графов [16], который позволяет разделить каркас на элементарные участки [17]. На данном этапе определяется функция каждого из участков, а также нормативные условия организации движения пешеходного потока согласно разработанной классификации. Результатами этапа являются:

• картограмма пешеходных потоков между различными элементами ТПУ;

• таблица с оценкой существующего планировочного решения [18];

• экспликация узлов пешеходных коммуникаций согласно табл. 2;

• экспликация участков пешеходных коммуникаций согласно табл. 3.

Второй этап — расчетный, включает:

• определение исходных данных по линейным участкам и коммуникационным элементам;

• расчет состава пешеходного потока с учетом МГН (табл. 4);

• расчет ширин линейных участков пешеходных коммуникаций (табл. 5);

• выбор планировочных и конструктивных решений коммуникационных элементов с учетом благоустройства;

• подбор необходимых условий универсальной среды, в зависимости от назначения и расположения пешеходной коммуникации, в структуре пешеходного каркаса.

Третий этап — контрольный, включает проверку результатов расчетов по требуемым услови-

Табл. 2. Форма экспликации инфраструктурных элементов (узлов) в ТПУ

Table 2. The legend of infrastructure elements (hubs) in a transport hub

Номер узла Hub No.	Тип элемента Element type	Функция Function	Качественная оценка Qualitative assessment	Описание узла Hub description
-----------------------	------------------------------	---------------------	---	----------------------------------

Табл. 3. Форма экспликации инфраструктурных линейных элементов (связей, участков) в ТПУ

Table 3. The legend of linear infrastructure elements (links, sites) in a transport hub

Номер связи Link No.	Территориальная зона Territorial zone	Функция Function	Описание связи Communication description
-------------------------	--	---------------------	---

Табл. 4. Категория МГН, % от общего количества МГН в потоке

Table 4. The category of low-mobility population groups, % in the total amount of low-mobility population in a flow

Номер связи Link No.	Пассажиры с детьми Passengers with children	Лица с ко- лясками Persons with strollers	Люди пожилого возраста Elderly persons	Лица с поражением опорно-двигательного аппарата (ПОДА) Persons having musculo- skeletal disabilities	Лица с нарушени- ем слуха и зрения Persons having hearing and vision impairments
-------------------------	--	---	--	--	--

Табл. 5. Форма экспликации линейных участков (ребер) пешеходных коммуникаций в ТПУ

Table 5. The legend of linear sites (edges) of pedestrian communications in a transport hub

Номер связи (участка) Link (site) No.	Длина комму- никации Communication length	Плотность D , м ² Density D , m ²	Скорость V , м/мин Speed V , m/min	Интенсивность q , м ² /мин Intensity q , m ² /min	Ширина пешеходных коммуникаций, м Pedestrian path width, m
---	--	--	--	---	---

ям, определенным для каждого типа пешеходных коммуникаций по параметрам:

- плотность пешеходного потока D — безопасность;
- интенсивность пешеходного потока q — комфортность;
- наличие универсальной среды — доступность элементов [19];
- ширина пешеходных коммуникаций как для линейных объектов, так и при слиянии потоков.

В соответствии с методикой расчета и данными кластеризации, представленными в этой работе, был сформулирован расчет с использованием программ-

ного обеспечения Excel, учитывающий исследования В.М. Предтеченского [10], В.В. Холщевникова [6] и Д.А. Самошина [8], для определения ширины пешеходных коммуникаций, принимая во внимание МГН, для формирования безопасных, комфортных пешеходных коммуникаций.

Для установления средневзвешенного значения проекций (табл. 6) для каждой коммуникации учитывалось общее количество определенных групп граждан на каждом участке пешеходных коммуникаций в ТПУ.

Формула для расчета средневзвешенного значения проекций:

$$\text{СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЕ} = \frac{\text{СУММПРОИЗВ (проекции различных групп; количественный состав)}}{\text{СУММ (количественный состав)}} \quad (1)$$

Для расчета состава потока на пешеходной коммуникации использовалось суммарное значение различных групп населения,двигающихся как от ТПУ, так и по направлению к нему.

Формула для расчета состава потока:

$$\text{РАСЧЕТ СОСТАВА ПОТОКА} = \text{К ТПУ (общее количество человек} \cdot \text{средневзвешенное значение)} + \text{ИЗ ТПУ (общее количество человек} \cdot \text{средневзвешенное значение)} \quad (2)$$

С учетом классификации, представленной в исследованиях, можно рассчитать ширину пешеходных коммуникаций (табл. 7) с учетом интенсивности q и плотности потока D для формирования безопасных и комфортных условий передвижения для всех групп граждан [20].

Для расчета ширины пешеходной коммуникации использовалось суммарное значение различных групп населения,двигающихся как от ТПУ, так

Табл. 6. Таблица сбор данных

Table 6. Data collection table

Параметрические характеристики по группам Parametric characteristics by group	48	69,1	30	52	58	69,1	Скорость, м/мин Speed, m/min		
	0,25	0,96	0,3	0,4	0,08	0,125	Проекция, м Projections, m		
Номер участка Site number	Пожилые Elderly persons	Беременные и люди с ко- лясками Pregnant women and persons with strollers	Лица с ПОДА Persons having musculo- skeletal disabilities	С нарушением зрения Visually impaired persons	Дети Children	Здоровые Healthy persons	Общее количество, чел. Total number, persons	Средневзвешенное значе- ние проекций для каждой коммуникации Average weighted significance of projections for each communication	Расчет состава потока Flow composition analysis

Табл. 7. Расчет ширины пешеходных коммуникаций в ТПУ

Table 7. The calculation of pedestrian communications width in a transport hub

Номер участка Site number	Длина коммуникации Communication length	Плотность Density	Скорость Speed	Интенсивность Intensity	Ширина коммуникации Communication width
N	...	...	...	...	...

и по направлению к нему, длина участка l , интенсивность q и плотность потока D .

Формула для расчета ширины пешеходной коммуникации:

$$b = \begin{cases} \text{ЕСЛИ } (O_{10} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60) < 2); \\ \text{ОКРВВЕРХ } (O_{10} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60); 2); \\ \text{ЕСЛИ } (O_{10} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60) > 2); \\ \text{ОКРВВЕРХ } (O_{10} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60); \\ 0,25)). \end{cases} \quad (3)$$

Для расчета ширины пешеходной коммуникации при слиянии потоков (табл. 8) применялось суммарное значение различных групп населения,

двигающихся как от ТПУ, так и по направлению к нему, длина участка l и плотность потока D .

Формула для расчета ширины пешеходной коммуникации при слиянии:

$$b = \begin{cases} \text{ЕСЛИ } (O_{36} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60) < 2); \\ \text{ОКРВВЕРХ } (O_{36} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60); 2); \\ \text{ОКРВВЕРХ } (O_{10} \cdot N_{10} / (K_{10} \cdot 60); 2)). \end{cases} \quad (4)$$

При ширине пешеходной коммуникации менее 2 м невозможно ее использовать двумя и более МГН [21]. Вследствие этого в расчете заложено округление до 2 м, если ширина пешеходной коммуникации не соответствует требованиям использования МГН.

Табл. 8. Расчет ширины пешеходных коммуникаций с учетом слияния потоков

Table 8. The calculation of the width of pedestrian communications with regard for the confluence of flows

Номер участка Site number	Номер участка Site number	Составляющее Constituent	Длина Length	Номер участка Site number	Плотность Density	Ширина коммуникации Communication width
N	N	...	...	...	...	...

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ТПУ для достижения главных целей социального развития необходим системный подход к организации пешеходных коммуникаций с учетом МГН, потому что именно оно в конечном счете определяет результат — возможность использования, а самое главное посещения ТПУ, дает вектор для анализа и развития ТПУ. Проектировщики, в первую оче-

редь, должны уметь не только выстраивать систему или ее поддерживать, но и развивать. Если пешеходные коммуникации работают без изменений, а ТПУ при этом набирает пропускную способность, то рано или поздно он будет неэффективен. От формирования пешеходных коммуникаций зависит безопасность населения, а следовательно, и эффективность работы ТПУ [22].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фон Бергаланфи Л. Общая теория систем — критический обзор // Исследования по общей теории систем: сб. переводов / общ. ред. и вст. ст. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина. М. : Прогресс, 1969. С. 23–82.
2. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой. М. : Экономика, 1975. 191 с.
3. Власов Д.Н. Научно-методологические основы развития агломерационных систем транспортно-пересадочных узлов (на примере Московской агломерации) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. : Моск. гос. строит. ун-т, 2013. 37 с.
4. Власов Д.Н., Шагмуратова А.В. Оценка планировочного развития транспортно-пересадочных узлов железнодорожного транспорта // Градостроительство. 2015. № 5 (39). С. 31–36.
5. Власов Д.Н. Транспортно-пересадочные узлы крупнейших городов (на примере Москвы): монография. М. : Изд-во АСВ, 2009. 96 с.
6. Холицевников В.В., Дмитриев А.С. Исследование закономерностей движения людских потоков на пешеходных путях в транспортно-коммуникационных узлах: деп. в ЦНИИС. № 988. М., 1978.
7. Алексеев Ю.В., Сомов Г.Ю. Предпроектная оценка градостроительно-инвестиционного потенциала сложившейся жилой застройки // Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ. М., 2016. 152 с.
8. Самошин Д.А. Современные программные комплексы для моделирования процесса эвакуации // Пожарная безопасность в строительстве. 2011. № 1. С. 62–65.

9. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. Parameters of pedestrian flow for modeling purposes // Proceedings of the Third International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, University of Wuppertal, Germany, 27–29 February 2008. 2008. Pp. 101–114.

10. Предтеченский В.М. О расчете движения людских потоков в зданиях массового назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1958. № 7. С. 157.

11. Предтеченский В.М., Тарасова Т.А., Калинин В.А. Методика натурных наблюдений за процессами движения людей при помощи кинофото съемки // Мат. XXI науч.-техн. конф. М. : МИСИ, 1962. С. 122.

12. Elshater A.M., Ibraheem F. From typology concept to smart transportation hub // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 153. Pp. 531–541. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.10.086

13. Robertson T., McCarthy A., Jegasothy E., Harris P. Urban transport infrastructure planning and the public interest: a public health perspective // Public Health Research & Practice. 2021. Vol. 31. Issue 2. DOI: 10.17061/phrp3122108

14. Щербина Е.В., Власов Д.Н. Развитие системы транспортно-пересадочных узлов Российской Федерации // Архитектура и строительство России. 2013. № 6. С. 2–7.

15. Волкова В.Н., Емельянов А.А. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: справочник. М. : Финансы и статистика, 2006. 848 с.

16. Данилина Н.В., Привезенцева С.В. Обеспечение условий доступа маломобильных групп граждан к инфраструктуре транспортно-пересадочных узлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 82–90.

17. Vuchic V.R. Transportation engineering and planning // Urban Public Transportation Systems. 2011. Vol. 1. 576 p.

18. Солодилова Л.А. Алгоритм оценки достижения экономической эффективности объекта проектирования для студентов-архитекторов // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. № 2. С. 6. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.6

19. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical Review E. 1995. Vol. 51. Issue 5. Pp. 4282–4286. DOI: 10.1103/physreve.51.4282

20. Bella F., Silvestri M. Effects of safety measures on driver's speed behavior at pedestrian crossings // Accident Analysis & Prevention. 2015. Vol. 83. Pp. 111–124. DOI: 10.1016/j.aap.2015.07.016

21. Lavrenz S.M., Vlahogianni E.I., Gkritza K., Ke Y. Time series modeling in traffic safety research // Accident Analysis & Prevention. 2018. Vol. 117. Pp. 368–380. DOI: 10.1016/j.aap.2017.11.030

22. Older S.J. Movement of pedestrians on footways in shopping streets // Traffic Engineering and Control. 1968. Vol. 10. Pp. 160–163.

Поступила в редакцию 8 сентября 2021 г.

Принята в доработанном виде 10 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Светлана Вячеславовна Привезенцева — старший преподаватель кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3497-0087; PrivezentsevaSV@mgsu.ru;

Сергей Игоревич Пичугин — финансовый директор; Аксиома; 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 35; sergey@pichugin.net.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fon Bertalanfi L. General system theory — a critical review. *Studies in General Systems Theory: Collection of Translations*. Moscow, Progress, 1969; 23-82. (rus.).

2. Chernyak Yu.I. *System analysis in economic management*. Moscow, Economics, 1975; 191. (rus.).

3. Vlasov D.N. *Scientific and methodological foundations for the development of agglomeration systems of transport interchange hubs (on the example of the Moscow agglomeration) : author. diss. doct.*

technical sciences. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2013; 37. (rus.).

4. Vlasov D.N., Shagimuratova A.A. Assessment of planning development of transport interchange hubs of railway transport. *Urban Planning*. 2015; 5(39):31-36. (rus.).

5. Vlasov D.N. *Transport hubs of the largest cities (on the example of Moscow) : monograph*. Moscow, Publishing house ASV, 2009; 96. (rus.).

6. Kholshchevnikov V.V., Dmitriev A.S. *Investigation of the patterns of movement of human flows*

on pedestrian paths in transport and communication hubs: *Dep. in TsNIIS. No. 988. Moscow, 1978. (rus.)*.

7. Alekseev Yu.V., Somov G.Yu. Pre-project assessment of the urban planning and investment potential of the existing residential development. *Library of scientific developments and projects of NRU MGSU. Moscow, 2016; 152. (rus.)*.

8. Samoshin D.A. Modern software products for simulation of the evacuation process. *Fire Safety in Construction. 2011; 1:62-65. (rus.)*

9. Kholoshevnikov V.V., Samoshin D.A. Parameters of pedestrian flow for modeling purposes. *Proceedings of the Third International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, University of Wuppertal, Germany, 27–29 February 2008. 2008; 101-114.*

10. Predtechenskii V.M. On the calculation of the movement of human flows in buildings of mass use. *Izvestia of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. 1958; 7:157. (rus.)*.

11. Predtechensky V.M., Tarasova T.A., Kalintsev V.A. Methodology of field observations of the processes of movement of people with the help of cinematography. *Materials of XXI scientific-technical conf. Moscow, MISI, 1962; 122. (rus.)*.

12. Elshater A.M., Ibraheem F. From Typology Concept to Smart Transportation Hub. *Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2014; 153:531-541. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.10.086*

13. Robertson T., McCarthy A., Jegasothy E., Harris P. Urban transport infrastructure planning and the public interest: a public health perspective. *Public Health Research & Practice. 2021; 31(2). DOI: 10.17061/phrp3122108*

Received September 8, 2021.

Adopted in revised form on November 10, 2021.

Approved for publication on November 10, 2021.

Bionotes: Svetlana V. Privezentseva — Senior Lecturer of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3497-0087; PrivezentsevaSV@mgsu.ru;

Sergey I. Pichugin — Financial Director; **Axiom**; 35 Marshal Govorov st., Saint-Petersburg, 198095, Russian Federation; sergey@pichugin.net.

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.

14. Sherbina E.V., Vlasov D.N. The development of the transit&transport terminals system in the Russian federation. *Architecture and construction of Russia. 2013; 6:2-7. (rus.)*.

15. Volkova V.N., Emelyanov A.A. *Systems theory and systems analysis in the management of organizations: a reference book. Moscow, Finance and Statistics, 2006; 848. (rus.)*.

16. Danilina N.V., Privezentseva S.V. Availability of transfer hub infrastructure to limited-mobility people. *Journal of Construction and Architecture. 2018; 20(1):82-90. (rus.)*.

17. Vuchic V.R. *Transportation engineering and planning. Urban Public Transportation Systems. 2011; 1:576.*

18. Solodilova L.A. An algorithm for evaluating the cost effectiveness of the facility under design for students with major in architecture. *Construction: Science and Education. 2020; 10(2):6. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.6 (rus.)*.

19. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E. 1995; 51(5):4282-4286. DOI: 10.1103/physrev.51.4282*

20. Bella F., Silvestri M. Effects of safety measures on driver's speed behavior at pedestrian crossings. *Accident Analysis & Prevention. 2015; 83:111-124. DOI: 10.1016/j.aap.2015.07.016*

21. Lavrenz S.M., Vlahogianni E.I., Gkritza K., Ke Y. Time series modeling in traffic safety research. *Accident Analysis & Prevention. 2018; 117:368-380. DOI: 10.1016/j.aap.2017.11.030*

22. Older S.J. Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control. 1968; 10:160-163.*

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 692.829

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451

Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния оконных профилей ПВХ при действии температурных нагрузок

Иван Сергеевич Аксенов, Александр Петрович Константинов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Опыт эксплуатации современных окон ПВХ в климатических условиях РФ показывает, что в зимнее время из-за температурных деформаций оконных профилей происходит продувание и промерзание подобных конструкций. В настоящий момент данное явление не учитывается при проектировании окон. Инженерная методика расчета температурных деформаций оконных конструкций еще не разработана. Одним из важных вопросов, который требует изучения для разработки этой методики, является учет температурных деформаций оконных ПВХ-профилей с учетом нелинейного распределения температуры по его сечению.

Материалы и методы. В программном комплексе COMSOL Multiphysics разработана трехмерная конечно-элементная модель типовой конструкции ПВХ-окна и проведен расчет ее температурного поля. Анализ результатов расчета позволил определить характер распределения температуры в поперечных сечениях оконных ПВХ-профилей и предложить методику его аналитического расчета. На основе использования базовых уравнений механики деформируемого твердого тела и методов математического анализа описан изгиб оконных профилей ПВХ с учетом установленного характера распределения температур по их сечению.

Результаты. Получены уравнения общего вида, описывающие изгиб оконных профилей ПВХ с учетом нелинейного (ступенчатого) распределения температуры в их поперечном сечении. Методика проверена путем сопоставления полученных с ее помощью результатов с данными трехмерного конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния оконных профилей ПВХ.

Выводы. Полученные уравнения, описывающие температурные деформации отдельных оконных профилей, служат отправной точкой для создания комплексной методики расчета механической работы оконных конструкций из ПВХ-профилей при действии температурных нагрузок. Дальнейшими этапами разработки данной методики являются изучение влияния армирующего сердечника на механическую работу ПВХ-профилей и переход к рассмотрению механической работы всей оконной конструкции в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температурные деформации, окна, оконные блоки, оконные профили ПВХ, строительная механика, конечно-элементное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аксенов И.С., Константинов А.П. Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния оконных профилей ПВХ при действии температурных нагрузок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1437–1451. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451

Автор, ответственный за переписку: Александр Петрович Константинов, apkonst@yandex.ru.

An analytical method for calculating the stress-strain state of PVC window profiles under thermal loading

Ivan S. Aksenov, Aleksandr P. Konstantinov

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

ABSTRACT

Introduction. The practical operation of modern PVC windows in the climate of the Russian Federation has proven that due to thermally induced deformations of window elements cold air enters premises and window frames freeze. Presently, there is no engineering method for calculating the temperature deformations of windows, that takes account of the key features of their structure: the composite structure of window sections, the rigidity of insulating glass units, fittings, etc. An important task is to develop a method for calculating temperature deformations of PVC window elements, that takes account of nonlinear temperature distribution over their cross-sections.

Materials and methods. A three-dimensional finite element model of a standard PVC window was developed using the COMSOL Multiphysics software, and its temperature field was calculated. The analysis of the calculation results allowed to identify the nature of the temperature distribution over the cross sections of PVC window profiles and propose a method for their analytical calculation. Using the basic equations of solid mechanics and methods of mathematical analysis, the bending of PVC window elements was described on the basis of their actual temperature fields.

Results. The obtained equations were tested by comparing the results of the manual calculation with the results of the finite element modeling.

Conclusions. The obtained equations, describing temperature deformations of individual window elements, serve as the starting point for an integrated method of calculating the structural behavior of PVC windows under thermal loading. The further development of the presented method will encompass the analysis of the influence of the reinforcing core on the structural behavior of PVC elements and the exploration of the structural behavior of the entire window structure.

KEYWORDS: temperature deformations, windows, PVC profiles, structural mechanics, finite element modeling

FOR CITATION: Aksenov I.S., Konstantinov A.P. An analytical method for calculating the stress-strain state of PVC window profiles under thermal loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1437-1451. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr P. Konstantinov, apkonst@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Оконные конструкции из ПВХ-профилей в настоящее время являются наиболее распространенным типом светопрозрачных конструкций, используемым в массовом гражданском строительстве [1, 2]. Опыт эксплуатации подобных конструкций в климатических условиях РФ показал, что в зимний период их воздухопроницаемость может значительно повышаться, что приводит к появлению сквозняков в помещениях, а также нарушению температурно-влажностного режима вблизи окон [3–9]. Указанное явление обусловлено температурными деформациями профильных элементов окна. Данные проведенных экспериментальных исследований демонстрируют, что прогиб оконного импоста от действия только температурной нагрузки может быть сопоставим с прогибом от ветровой нагрузки [10–12]. Решение описанной проблемы сопряжено с изучением статической работы элементов окна при действии ветровых и температурных нагрузок. На сегодняшний день научные исследования по этому вопросу представлены в ограниченном объеме. Так, оценка влияния температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние (НДС) оконных конструкций была выполнена средствами программного комплекса ANSYS в работе [13]. В публикации [14] представлена упрощенная модель, которая позволяет определить чистый прогиб ПВХ-импоста от линейного перепада температуры между внутренней и наружной его поверхностью. Эта модель учитывает наличие в импосте армирующего сердечника [15]. Авторы в труде [16] рассматривают проблему моделирования механической работы уплотнителя в системе окна. Ни в одной из существующих работ не была сделана попытка разработать комплексный инженерный метод расчета механической работы оконной конструкции из ПВХ при действии температурной нагрузки. В нормативной документации описан метод расчета механической работы окон только на действие ветровых нагрузок, а действие температурных нагрузок не принимается во внимание. Однако он является достаточно упрощенным, не учитывает многокомпонентную структуру окна, не отражает ее

реальной работы под нагрузкой [17]. В настоящей статье рассматривается один из вопросов, затрагиваемых в рамках создания комплексной инженерной методики расчета температурных деформаций оконных конструкций из ПВХ-профилей. Он связан с разработкой метода аналитического расчета температурных деформаций профильных элементов ПВХ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ поля температур

В программном комплексе COMSOL Multiphysics была разработана трехмерная конечно-элементная модель двухстворчатого ПВХ-окна размером 1400×1200 мм профильной системы Veka Softline (с монтажной шириной 70 мм), установленного в проем наружной стены. Проведен расчет температурного поля созданной модели для зимних условий эксплуатации при следующих исходных данных: $t_{ex} = -20$ °C; $t_{in} = 20$ °C; $\alpha_{ex} = 8,7$ Вт/м²/°C; $\alpha_{in} = 23$ Вт/м²/°C (рис. 1). Теплообмен в воздушных камерах профильных элементов рассчитывался упрощенно, с использованием эквивалентного сопротивления теплопередаче.

Анализ механической работы ПВХ-профиля при действии температурной нагрузки

Оконный профиль ПВХ представляет собой протяженный элемент постоянного поперечного сечения, который воспринимает в основном только поперечные механические и температурные нагрузки, т.е. с точки зрения строительной механики работает как балка. В инженерной практике широко применяются формулы расчета механической работы балочных элементов на действие температурных нагрузок. Однако они получены исходя из предположения о том, что температура изменяется в поперечном сечении балки линейно [18]. Анализ результатов расчета температурного поля ПВХ-окна показал (см. Результаты исследования), что распределение температуры в поперечных сечениях его профильных элементов отличается от классического случая и является ступенчатым (рис. 2).

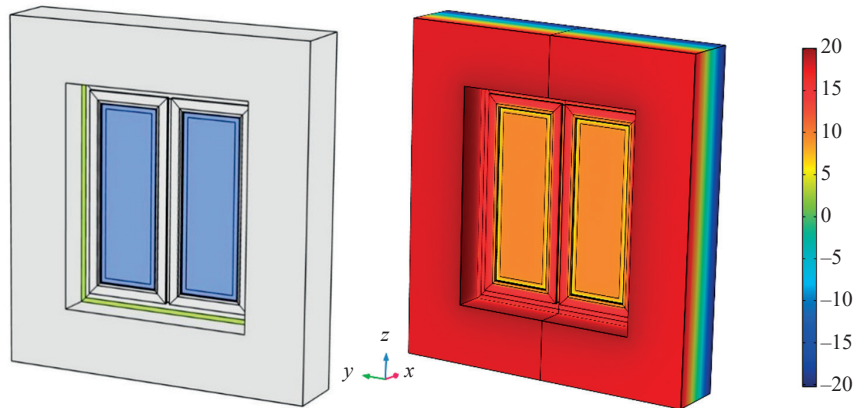


Рис. 1. Трехмерная модель окна ПВХ и результат расчета поля температур (легенда в °С)

Fig. 1. The 3D PVC window model and the temperature field calculation result, °C

Классические формулы, описывающие изгиб балки, не дают возможности рассчитать деформации балочного элемента при нелинейном (ступенчатом) распределении температур по сечению балки. Для того чтобы получить уравнения, описывающие рассматриваемый случай изгиба, авторы использовали основы теории упругости деформируемого твердого тела [19]. Изучили линейные преобразования элементарного куба, выделенного в произвольном месте сечения балки, при воздействии на балку температурной нагрузки и изгиба. На основе композиции этих линейных преобразований были получены уравнения для главных напряжений в поперечном сечении изогнутой балки при ступенчатом профиле температуры. Путем интегрирования этих уравнений найдены функции, связывающие продольные деформации и кривизну изгиба балки

с характеристиками ступенчатого профиля температуры и величинами приложенных к балке нагрузок (момента и продольной силы). Справедливость полученных уравнений проверена их сравнением с результатами конечно-элементного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характер распределения температур по оконному профилю ПВХ

Анализ результатов расчета температурного поля модели ПВХ-окна показал, что характер распределения температуры в поперечном сечении его профильных элементов может быть упрощенно представлен в виде графика, изображенного на рис. 3. В центре ПВХ-профиля находится металлический сердечник, имеющий почти нулевое термическое сопротивление, поэтому в зоне сердечника температурное поле остается практически полностью однородным. Участок сечения ПВХ-профиля, непосредственно прилегающий к сердечнику, также приобретает постоянную температуру.

С учетом полученного характера распределения температуры по сечению ПВХ-профиля возможно говорить, что расчет его температурного поля можно вести как для однородной трехслойной ограждающей конструкции. Разделим для этого поперечное сечение ПВХ-профиля на три части (I, II и III на рис. 3), в пределах которых распределение температур остается линейным. Как уже было сказано, термическое сопротивление средней части будет мало, поэтому примем $R_{II} = 0$. Полное термическое сопротивление профиля в таком случае будет равно:

$$R_0 = R_I + R_{III}. \quad (1)$$

Значение R_0 может быть определено расчетами или в ходе лабораторных испытаний по стандартным методикам и обычно сообщается производителями оконных профилей в своей технической документации. Проведя дополнительные исследования, выясним соотношение величин R_I и R_{III} . В первом приближении (для рассматриваемого на рис. 3 окон-

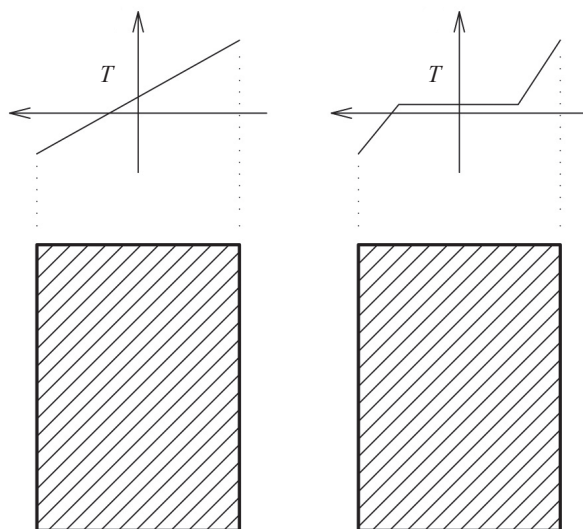


Рис. 2. Распределение температуры по сечению балочного элемента. Отличие рассматриваемого случая (справа) от классического (слева)

Fig. 2. The temperature distribution over a beam element section. The difference between the case in question (on the right) and the classical one (on the left)

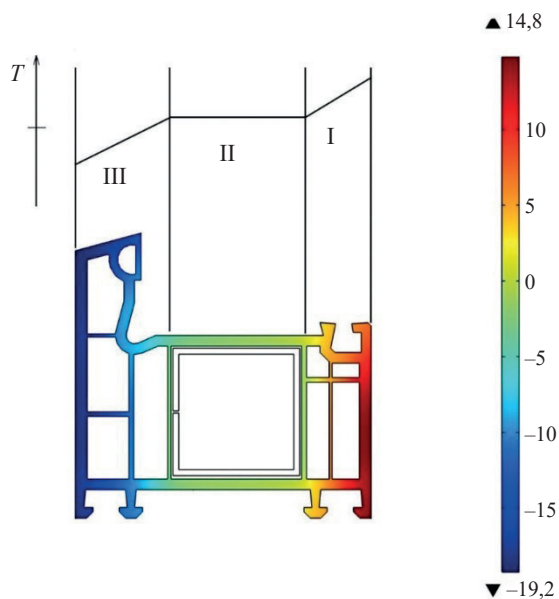


Рис. 3. Характер распределения температур в поперечном сечении ПВХ-профиля, полученный в результате расчета температурного поля для трехмерной модели окна (легенда в °C)

Fig. 3. The temperature distribution in a cross-section of a PVC profile, obtained as a result of the temperature field calculation for a 3D model, °C

ного профиля с практически симметричным расположением армирующего сердечника относительно ПВХ-профиля и одинаковым количеством воздушных камер по его сторонам) примем $R_I = R_{III}$, тогда:

$$R_I = R_{III} = \frac{R_0}{2}. \quad (2)$$

Далее, зная расчетные значения температуры наружного и внутреннего воздуха, а также коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхности оконного профиля, можно построить график распределения температуры.

Проведем проверку предлагаемого метода расчета температурного поля для показанного на рис. 3 профиля (пятикамерный профиль рамы Veka Soft-line шириной 70 мм). Условия расчета: $t_{ex} = -20$ °C; $t_{in} = 20$ °C; $\alpha_b = 8,7$ Вт/м²/°C; $\alpha_n = 23$ Вт/м²/°C. Для рассматриваемого профиля известно его термическое сопротивление $R_0 = 0,77$ м²·°C/Вт. Таким образом, $R_I = 0,385$ м²·°C/Вт; $R_{II} = 0$; $R_{III} = 0,385$ м²·°C/Вт. Путем стандартного теплотехнического расчета определим график распределения температуры (рис. 4).

Для сравнения результатов, полученных ручным расчетом и компьютерным моделированием, была найдена разница между температурными полями, изображенными на рис. 3 и 4 (см. рис. 5).

Как видно, большая часть сечения профиля находится в зеленой зоне (где разница составляет не более 2 °C). Отдельные участки (два красных и один синий), где результаты ручного расчета значительно расходятся с результатами моделирования, имеют небольшие размеры. Наблюдаемые

расхождения объясняются тем, что в реальности ПВХ-профиль является неоднородным элементом (вследствие сложной геометрии, наличия воздушных камер, теплообмена с примыкающими элементами оконной конструкции), и точный расчет его температурного поля не может быть выполнен аналитическим путем. Между тем можно сказать, что предложенная методика ручного расчета при своей простоте дает приемлемый результат и отражает качественный характер температурного поля, возникающего в профильных элементах ПВХ-окна при реальной эксплуатации. Очевидно, что данный метод расчета возможно использовать для построения графика распределения температур по сечению оконных профилей ПВХ с иным соотношением количества наружных и внутренних воздушных камер.

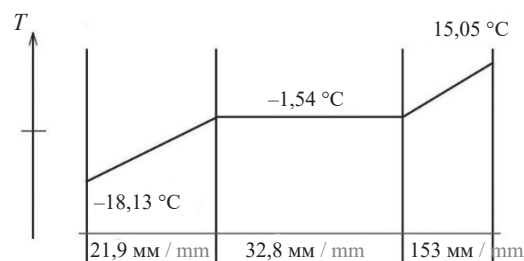


Рис. 4. Результат ручного расчета распределения температуры по сечению профиля ПВХ

Fig. 4. The result of manual calculation of temperature distribution over the section of a PVC element

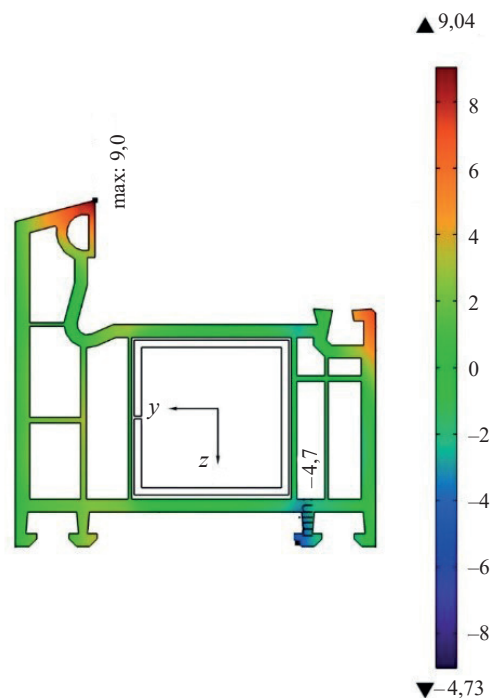


Рис. 5. Разница между ручным расчетом и результатом компьютерного моделирования, °C

Fig. 5. The discrepancy between the manual calculation and the result of computer modeling, °C

Методика расчета механической работы ПВХ-профиля на действие температурной нагрузки

Температурные напряжения в профиле

Определим напряжения, возникающие в поперечном сечении ПВХ-профиля от действия температурной нагрузки. Зададим функцию распределения температуры общего вида $T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$, где $0x_{obj}y_{obj}z_{obj}$ — материальная (лагранжева) система координат профиля, ось x_{obj} которой направлена вдоль его продольной оси (см. рис. 6).

Вырежем из профиля в произвольной точке $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$ элементарный куб со стороной da , грани которого параллельны выбранным осям координат (рис. 7). Изначально температура элементарного куба (как и всех точек профиля) была равна T_{ref} . В результате температурных воздействий она изменилась и приняла значение $T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$. Таким образом, выделенный элементарный объем нагрелся на $\Delta T = T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj}) - T_{ref}$. Позволим ему свободно деформироваться. В результате нагрева на величину ΔT , длина каждой из его граней увеличится (рассматривается случай изотропного материала) и станет равна $da(1 + \alpha\Delta T)$ (переход 1 на рис. 7). В этом новом состоянии в кубе отсутствуют какие-либо напряжения. Теперь, чтобы вернуть куб к исходному

размеру (переход 2 на рис. 7), необходимо к каждой его грани приложить сжимающие усилия. Матрица линейного преобразования, выражающая переход 2, будет иметь вид:

$$A_i = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \Delta T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

На основе матрицы A_i можно найти тензор напряжений σ (он будет шаровым) для любой точки ПВХ-профиля. Эти напряжения будут соответствовать случаю, когда функция перемещений $u(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj}) \equiv 0$, т.е. все точки профиля жестко зафиксированы в своих положениях, а профиль находится в своем исходном состоянии. При этом, определяемые через A_i напряжения будут показывать внутренние усилия, возникающие в профиле в результате мгновенного изменения температуры в самый первый момент процесса деформирования.

Изгиб профиля

Пусть задана параметрическая функция $u_{ax}(x_{obj})$, отображающая ось x_{obj} балки в изогнутую кривую α в трехмерном пространстве (рис. 8). Воспользуемся гипотезой о плоских сечениях [18]. Постулируем, что в каждой точке изогнутой оси балки ее сечение

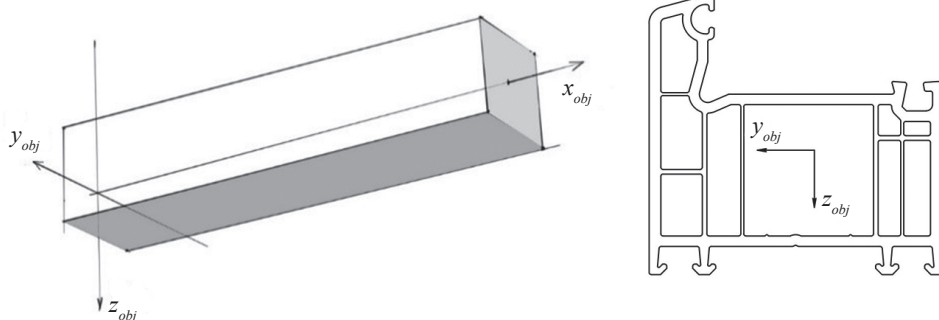


Рис. 6. Система координат для ПВХ-профиля

Fig. 6. A coordinate system for a PVC profile

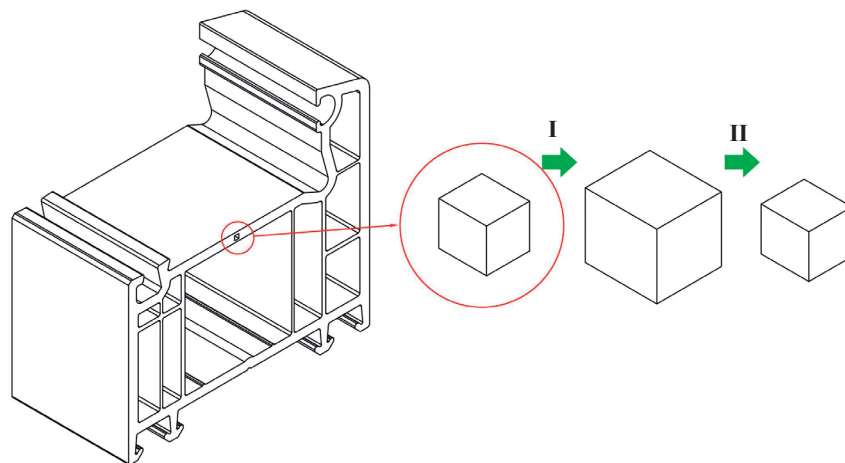


Рис. 7. Преобразования элементарного куба

Fig. 7. Transformations of an elementary cube

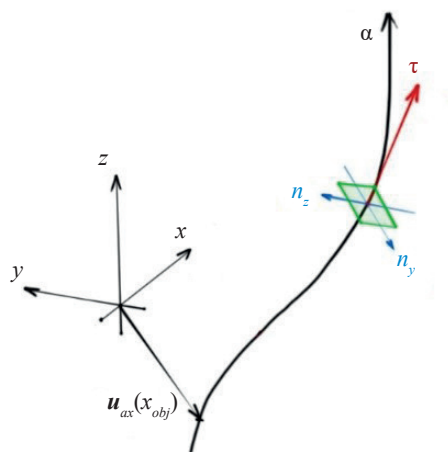


Рис. 8. Изгиб оси балки

Fig. 8. The bending of the beam axis

остается плоским и ориентировано перпендикулярно вектору $\vec{\tau}$, являющемуся касательным к оси.

В каждой точке кривой введем локальный ортонормированный правый базис $(\vec{\tau}, \vec{n}_y, \vec{n}_z)$, где:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^{-1}; \quad (4)$$

$$\vec{n}_z = \frac{d^2\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \left| \frac{d^2\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^{-1}, \quad (5)$$

$$\vec{n}_y = \vec{n}_z \vec{\tau}. \quad (6)$$

Для удобства предположим, что кривая α целиком лежит, например, в плоскости Oxz , тогда:

$$\vec{\tau} = \begin{pmatrix} \frac{d\vec{u}_{ax1}}{dx_{obj}} \\ \frac{d\vec{u}_{ax2}}{dx_{obj}} \\ 0 \\ \frac{d\vec{u}_{ax3}}{dx_{obj}} \end{pmatrix} \left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^{-1}, \quad (7)$$

$$\vec{n}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\vec{n}_y = \begin{pmatrix} \frac{d\vec{u}_{ax3}}{dx_{obj}} \\ 0 \\ -\frac{d\vec{u}_{ax1}}{dx_{obj}} \end{pmatrix} \left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^{-1}. \quad (9)$$

Заметим, что $\vec{n}_y = \alpha_{y\perp} \vec{\tau}$, где $\alpha_{y\perp}$ — матрица поворота на 90° вокруг оси y .

Теперь запишем функцию преобразования, которая каждой точке в системе координат $x_{obj}, y_{obj}, z_{obj}$ поставит в соответствие ее положение x, y, z в деформированном состоянии

$$\vec{R} = \vec{u}_{ax}(x_{obj}) + \vec{n}_z z_{obj} + \vec{n}_y y_{obj}, \quad (10)$$

Запишем матрицу Якоби функции преобразования $\vec{R}$:

$$J_R = \begin{pmatrix} \frac{du_{ax1}}{dx_{obj}} + y_{obj} \frac{dn_{y1}}{dx_{obj}} & n_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{du_{ax3}}{dx_{obj}} + y_{obj} \frac{dn_{y3}}{dx_{obj}} & n_{y3} & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Найдем метрический тензор:

$$T = J_R^T J_R = \begin{pmatrix} \left(\frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} + y_{obj} \frac{d\vec{n}_y}{dx_{obj}} \right)^2 & y_{obj} \frac{d\vec{n}_y}{dx_{obj}} \vec{n}_y & 0 \\ y_{obj} \frac{d\vec{n}_y}{dx_{obj}} \vec{n}_y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Определим, чему равна производная вектора $\vec{n}_y$:

$$\frac{d\vec{n}_y}{dx_{obj}} = \frac{d(\alpha_{y\perp} \vec{\tau})}{dx_{obj}} = \alpha_{y\perp} \frac{d\vec{\tau}}{dx_{obj}} = \alpha_{y\perp} \frac{d}{dx_{obj}} \left(\frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^{-1} \right) = \alpha_{y\perp} \frac{\frac{d^2\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} - \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d}{dx_{obj}} \left(\left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| \right)}{\left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx_{obj}} \left(\left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| \right) &= \frac{d}{dx_{obj}} \left(\sqrt{\left(\frac{du_{ax1}}{dx_{obj}} \right)^2 + \left(\frac{du_{ax2}}{dx_{obj}} \right)^2 + \left(\frac{du_{ax3}}{dx_{obj}} \right)^2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \frac{2 \frac{du_{ax1}}{dx_{obj}} \frac{d^2u_{ax1}}{dx_{obj}^2} + 2 \frac{du_{ax2}}{dx_{obj}} \frac{d^2u_{ax2}}{dx_{obj}^2} + 2 \frac{du_{ax3}}{dx_{obj}} \frac{d^2u_{ax3}}{dx_{obj}^2}}{\sqrt{\left(\frac{du_{ax1}}{dx_{obj}} \right)^2 + \left(\frac{du_{ax2}}{dx_{obj}} \right)^2 + \left(\frac{du_{ax3}}{dx_{obj}} \right)^2}} = \frac{\frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d^2\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}^2}}{\left| \frac{d\vec{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|}. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом:

$$\frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} = \alpha_{y\perp} \frac{\frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| - \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2}}{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2} =$$

$$= \alpha_{y\perp} \frac{\frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \left(\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right) - \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \left(\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \right)}{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^3} = \alpha_{y\perp} \frac{\left[\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \left[\frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right] \right]}{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^3}.$$

Введем вектор $\bar{K}$, который будет сонаправлен вектору $\bar{n}_y$ и равен по модулю кривизне рассматриваемой параметрической кривой α :

$$\bar{K} = \frac{\frac{d^2\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}^2} \cdot \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}}}{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^3}. \quad (16)$$

С учетом этого перепишем:

$$\frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} = \alpha_{y\perp} \left(\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \bar{K} \right). \quad (17)$$

На рис. 9 видно, что повернутый на 90 градусов вектор $\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \bar{K}$ будет перпендикулярен вектору $\bar{n}_y$, поэтому $T_{12} = T_{21} = 0$.

Также перепишем значение T_{11} с учетом всех полученных соотношений:

$$T_{11} = \left(\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} + y_{obj} \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} \right)^2 = \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 +$$

$$+ y_{obj}^2 \left| \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} \right|^2 + 2y_{obj} \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \cdot \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}}, \quad (18)$$

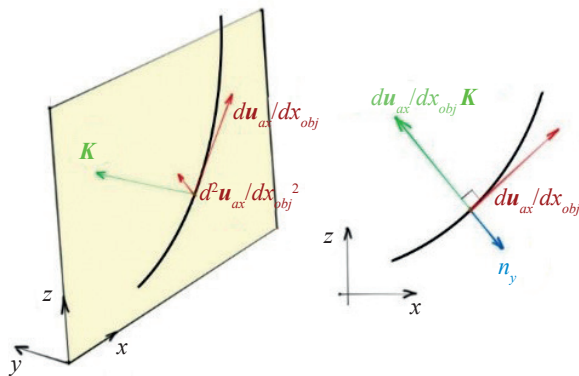


Рис. 9. К выводу компонент метрического тензора

Fig. 9. The derivation of the metric tensor component

$$\left| \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} \right| = \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \bar{K} \right| = \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| |\bar{K}| \quad (19)$$

(векторы перпендикулярны друг другу);

$$\frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} = \pm \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| \left| \frac{d\bar{n}_y}{dx_{obj}} \right| = \pm \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 |\bar{K}|. \quad (20)$$

(векторы коллинеарны друг другу).

Окончательно:

$$T_{11} = \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 + y_{obj}^2 K^2 \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 \pm 2y_{obj} K \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 =$$

$$= \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 (1 \pm y_{obj} K)^2, \quad (21)$$

где K — кривизна оси профиля в точке x_{obj} .

Метрический тензор при этом получит вид:

$$T = J_R^T J_R = \begin{pmatrix} \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|^2 (1 + y_{obj} K)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Здесь предполагается, что кривизна K может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Правило выбора знака при этом показано на рис. 10.

Глядя на метрический тензор, можно сделать следующие выводы: оси системы координат $0x_{obj}y_{obj}z_{obj}$ являются главными осями тензора деформаций при изгибе профиля. Если выделить в точке $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$ профиля элементарный куб, грани которого будут параллельны системе координат $0x_{obj}y_{obj}z_{obj}$ (по аналогии с рис. 7), то в результате изгиба грани этого куба подвергнутся следующему линейному преобразованию:

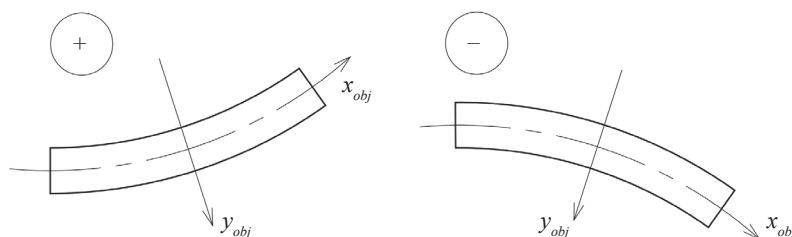


Рис. 10. Правило выбора знака кривизны профиля

Fig. 10. The rule governing the selection of the character for the profile curvature

$$A_b = \begin{pmatrix} \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| (1 + y_{obj} K) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Изгиб профиля при температурной нагрузке

Если профиль одновременно подвергается температурной нагрузке и изгибу, то любой элементарный куб, выделенный в нем в точке $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$ (с гранями, параллельными системе координат $0x_{obj}y_{obj}z_{obj}$), будет подвергаться композиции линейных преобразований A_t и A_b :

$$A = A_t A_b = \frac{1}{1 + \alpha \Delta T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})} \begin{pmatrix} \left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| (1 + y_{obj} K) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

При этом тензор деформаций (в главных осях) будет иметь вид $D = A - E$.

Предположим, что в поперечном направлении сечение профиля имеет возможность свободно деформироваться, т.е. напряжения в направлении осей y_{obj} и z_{obj} имеют возможность к полной релаксации (что почти соответствует действительности), тогда любой элементарный куб, выделенный в профиле, будет находиться в одноосном напряженном состоянии, испытывая центральное растяжение в направлении оси x_{obj} с относительной деформацией:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| (1 + y_{obj} K)}{1 + \alpha \Delta T(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})} - 1. \quad (25)$$

В нем будут возникать напряжения:

$$\sigma = \begin{pmatrix} E\varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (26)$$

где E — модуль упругости материала.

Данные формулы являются универсальными и позволяют исследовать внутренние напряжения в изогнутом профиле при действии произвольной (не только линейной) температурной нагрузки.

Определение внутренних усилий

Внутренние усилия определяются следующим образом (далее предполагается, что поперечные деформации, которые испытывает сечение профиля, являются пренебрежимо малыми по сравнению с размерами самого профиля):

$$N = \iint \sigma_{xx} dA, \quad (27)$$

$$M_z = \iint \sigma_{xx} y_{obj} dA, \quad (28)$$

$$M_y = \iint \sigma_{xx} z_{obj} dA. \quad (29)$$

Введем кусочно-заданную функцию распределения температуры в поперечном сечении профиля, соответствующую результатам моделирования из раздела 1 (рис. 11):

$$T = \begin{cases} T_1 + \frac{T_2 - T_1}{y_2 - y_1} (y_{obj} - y_1) & \text{при } y_{obj} \in [y_1, y_2]; \\ T_2 + \frac{T_3 - T_2}{y_3 - y_2} (y_{obj} - y_2) & \text{при } y_{obj} \in (y_2, y_3); \\ T_3 + \frac{T_4 - T_3}{y_4 - y_3} (y_{obj} - y_3) & \text{при } y_{obj} \in [y_4, y_3]. \end{cases} \quad (30)$$

Пока будем игнорировать тот факт, что $T_3 = T_2$, чтобы получить более универсальные уравнения. Функция напряжений при этом также будет иметь кусочно-заданный вид:

$$\sigma_{xx}^i = E \left(\frac{\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right| (1 + y_{obj} K)}{1 + \alpha (T_i + R^i (y_{obj} - y_i) - T_{ref})} - 1 \right) \quad (31)$$

при $y_{obj} \in [y_i, y_{i+1}]$,

где R^i — производная графика температуры на i -м участке.

Данная функция не является линейной относительно материальных координат профиля и потому

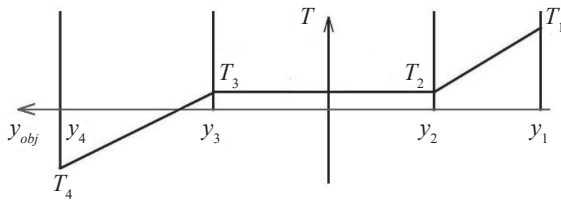


Рис. 11. Кусочно-заданная функция температуры

Fig. 11. Piecewise temperature function

она трудно интегрируема, тем не менее ее изучение на конкретных примерах показало, что в пределах каждого из трех участков она имеет вид, близкий к линейному (вследствие малого поперечного размера ПВХ-профиля и его малой кривизны, которую можно оценить по результатам реальных испытаний ПВХ-окон на температурную нагрузку, а также малого значения коэффициента линейного температурного расширения ПВХ, равного $7 \cdot 10^{-5}$ 1/К [20]). Поэтому возможно без потери точности представить функцию σ_{xx} в виде, аналогичном функции T :

$$\sigma_{xx}^i = \sigma_{xx_i} + \frac{\sigma_{xx_{i+1}} - \sigma_{xx_i}}{y_{i+1} - y_i} (y_{obj} - y_i) \quad \text{при } y_{obj} \in [y_i, y_{i+1}], \quad (32)$$

где четыре величины σ_{xx_i} будут определяться по формуле (26).

Это уравнение — линейное и может быть проинтегрировано для нахождения внутренних усилий. Опуская промежуточные выкладки и обозначив для

упрощения выражений величину $\left| \frac{d\bar{u}_{ax}}{dx_{obj}} \right|$ символом

k_{ax} , приводим результат:

$$N = Ek_{ax} \left[\sum (a^i A^i + b^i S_z^i) + K \sum (d^i A^i + c^i S_z^i) \right] - EA, \quad (33)$$

$$M_z = Ek_{ax} \left[\sum (a^i S_z^i + b^i I_z^i) + K \sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i) \right] - ES_z, \quad (34)$$

$$a^i = \frac{y_{i+1}/\varphi_i - y_i/\varphi_{i+1}}{y_{i+1} - y_i}, \quad b^i = \frac{1/\varphi_{i+1} - 1/\varphi_i}{y_{i+1} - y_i},$$

$$c^i = \frac{y_{i+1}/\varphi_{i+1} - y_i/\varphi_i}{y_{i+1} - y_i}, \quad d^i = -y_{i+1}y_i b^i, \quad (35)$$

$$\varphi_i = 1 + \alpha(T_i - T_{ref}),$$

где A^i , S_z^i , S_y^i , I_z^i , I_y^i — площадь, статический момент и момент инерции i -го участка поперечного сечения профиля соответственно (геометрические параметры участков сечения рассчитываются относительно одной общей оси, которая может быть выбрана произвольно).

Определим величину k_{ax} , выразив ее из уравнения для N :

$$k_{ax} = \frac{N/E + A}{\sum (a^i A^i + b^i S_z^i) + K \sum (d^i A^i + c^i S_z^i)}. \quad (36)$$

Из этого выражения понятно, где должна проходить нейтральная ось всего сечения. Продольная деформация нейтральной оси не должна зависеть

от радиуса кривизны K стержня (именно в этом смысле говорят, что сечение при изгибе поворачивается вокруг нейтральной оси), потому ее положение может быть найдено из условия:

$$\sum (d^i A^i + c^i S_z^i) = 0. \quad (37)$$

Используя формулы перехода от одной системы координат к другой, получаем:

$$y_{no} = \frac{\sum (d^i A^i + c^i S_z^i)}{\sum c^i A^i}. \quad (38)$$

Далее будем предполагать, что сечение рассматривается относительно нейтральной оси.

Перепишем выражение для k_{ax} :

$$k_{ax} = \frac{N}{E \sum (a^i A^i + b^i S_z^i)} + \frac{A}{\sum (a^i A^i + b^i S_z^i)}. \quad (39)$$

Второе слагаемое в этой формуле соответствует коэффициенту продольной деформации оси профиля при свободной температурной деформации ($N = 0$):

$$k_{ax}^{cb} = \frac{A}{\sum (a^i A^i + b^i S_z^i)}. \quad (40)$$

Сравнивая первое слагаемое с классическим выражением для продольной деформации балки при центрально приложенной нагрузке, можно заключить, что величина $\sum (a^i A^i + b^i S_z^i)$ выступает в качестве эквивалентной площади всего сечения:

$$A_{эKB} = \sum (a^i A^i + b^i S_z^i). \quad (41)$$

С учетом этого, запишем:

$$k_{ax} = \frac{N}{EA_{эKB}} + k_{ax}^{cb}. \quad (42)$$

Определим кривизну профиля, выразив ее из уравнения для M_z :

$$K = \frac{M_z + ES_z}{Ek_{ax} \sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)} - \frac{\sum (a^i S_z^i + b^i I_z^i)}{\sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)}. \quad (43)$$

Ввиду большого значения модуля упругости ПВХ и малого значения его коэффициента продольного температурного расширения, величина k_{ax} , характеризующая продольную деформацию оси профиля, будет во всех практически значимых случаях близка к 1. Учитывая это, перепишем выражение для K :

$$K = \frac{M_z}{E \sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)} + \frac{S_z - \sum (a^i S_z^i + b^i I_z^i)}{\sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)}. \quad (44)$$

Второе слагаемое в этой формуле соответствует кривизне профиля при свободной температурной деформации ($M_z = 0$):

$$K_{cs} = \frac{S_z - \sum (a^i S_z^i + b^i I_z^i)}{\sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)}. \quad (45)$$

Сравнивая первое слагаемое с классическим выражением для K , можно заключить, что величина

$\sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)$ выступает в качестве эквивалентного момента инерции всего сечения:

$$I_{\text{экв}} = \sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i). \quad (46)$$

С учетом этого, запишем:

$$K = \frac{M_z}{EI_{\text{экв}}} + K_{\text{св}}. \quad (47)$$

Используя данные формулы, можно производить расчет профиля на изгиб при произвольном трехчастном ступенчатом распределении температуры в его поперечном сечении.

Проверочный расчет

Продолжим расчет профиля, рассмотренного в разделе 1, и определим его кривизну и НДС при свободной температурной деформации от действия температурного поля, изображенного на рис. 4. Исследуя профиль в произвольно выбранной системе координат (рис. 12), определяем положение его

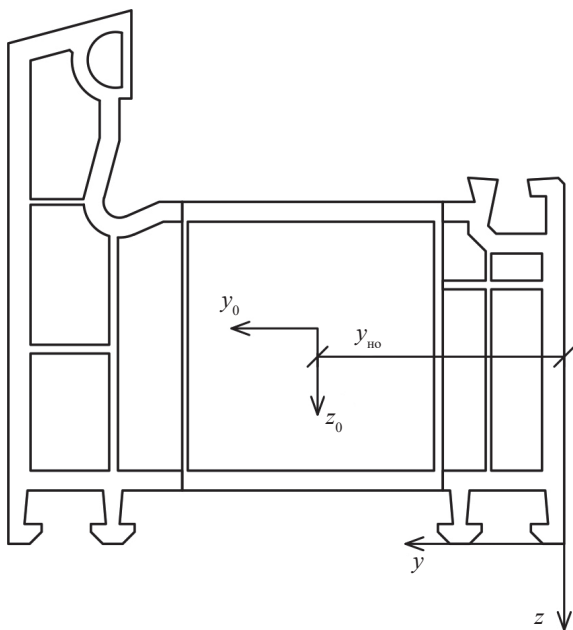


Рис. 12. К определению положения нейтральной оси

Fig. 12. About the identification of the position of the neutral axis

нейтральной оси. Для удобства все расчеты велись в программе Excel в табличной форме (рис. 13).

Таким образом, $y_{\text{но}} = 38,422$ мм.

Переносим ось y в новое положение y_0 и заново определяем все необходимые геометрические параметры сечения (рис. 14).

Определим коэффициент продольной деформации оси профиля в свободном состоянии (рис. 15).

Таким образом, $k_{\text{св}} = 0,998348$, что очень близко к 1 и оправдывает упрощение, сделанное при выводе формул.

Найдем кривизну профиля при свободной температурной деформации (рис. 16).

Таким образом, $K_{\text{св}} = -0,02567$ 1/м. Отрицательный знак свидетельствует о том, что под действием рассматриваемой температурной нагрузки профиль выгибается против направления оси y (рис. 10), что соответствует интуитивным представлениям: выгиб происходит в сторону теплого края.

Теперь найдем внутренние напряжения в профиле при свободной температурной деформации по формуле:

$$\sigma_{xy_i} = E \left(\frac{k_{\text{св}} (1 + y_i K)}{\varphi_i} - 1 \right). \quad (48)$$

Отметим, что поскольку мы рассматриваем свободную температурную деформацию, то $k_{\text{св}} = k_{\text{св}}^{\text{св}}$ и $K = K_{\text{св}}$. Расчет приведен на рис. 17.

По результатам ручного расчета при свободной температурной деформации внутри рассматриваемого ПВХ-профиля будут возникать напряжения, изображенные на рис. 18.

Как видно, характер распределения внутренних напряжений в поперечном сечении профиля при ступенчато изменяющейся по сечению температуре действительно не соответствует классическому случаю.

Для проверки правильности полученного решения в программе COMSOL Multiphysics была поставлена трехмерная задача, аналогично описанной выше: в поперечном сечении ПВХ-профиля длиной 1 м установлено поле температур, соответствующее рис. 4 (см. рис. 19), после чего были рассчитаны деформации и внутренние напряжения, возникающие

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Szi, cm^3	Ai, cm^2	Ti, degC	yi, cm	phi_i	ci	bi, 1/m	di, m	di*Ai+ci*Szi, m^3	ci*Ai, m^2
2	1,4972	2,6148	15,05	0	0,9996535	1,00151	0,076042927	0	1,49946E-06	0,000261875
3	6,7907	2,2034	-1,54	1,53	0,9984922	1,00151	0	0	6,80095E-06	0,000220673
4	26,319	4,2183	-1,54	4,81	0,9984922	1,005238	0,053249601	0,0001793	2,65325E-05	0,000424039
5			-18,13	7	0,9973309			сумма=	3,48329E-05	0,000906587
6										
7	alfa	0,00007	1/K							
8	Tref	20	degC							
9	y_но	38,422	mm							

Рис. 13. Расчет положения нейтральной оси профиля

Fig. 13. The calculation of the position of the neutral axis

	A	B	C
1	I_{zi}, cm^4	S_{zi}, cm^3	A_i, cm^2
2	28,561	-8,549	2,6148
3	4,157	-1,675	2,2034
4	25,809	10,111	4,2183

Рис. 14. Геометрические параметры сечения относительно нейтральной оси

Fig. 14. Geometric parameters of a section relative to the neutral axis

в профиле при его свободном изгибе под действием этой температурной нагрузки.

На рис. 20 показаны продольные напряжения в поперечном сечении ПВХ-профиля по результатам расчета в COMSOL Multiphysics. Для того чтобы более наглядно сравнить результаты ручного расчета и моделирования, на рис. 21 показаны продольные напряжения вдоль линии А-А.

Как видно, распределение нормальных напряжений, полученное при полноценном моделировании, полностью соответствует результатам предлагаемых в настоящей статье теоретических расчетов.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		S_{zi}, cm^3	A_i, cm^2	T_i, degC	y_i, cm	ϕ_{i_i}	a_i	$b_i, 1/\text{cm}$	$a_i \cdot A_i + b_i \cdot S_{zi}, \text{cm}^2$
2		-8,549	2,6148	15,05	-3,842	0,999654	1,003268	0,00076	2,616845151
3		-1,675	2,2034	-1,54	-2,312	0,998492	1,00151	0	2,206727303
4		10,111	4,2183	-1,54	0,968	0,998492	1,000995	0,000532	4,227880128
5				-18,13	3,158	0,997331			
6	Сумма=	-0,113	9,0365						9,051452582
7		alfa=	0,00007	1/K					
8		Tref=	20	degC					
9		kax_св=	0,998348046						

Рис. 15. Определение величины k_{ax}^{cb}

Fig. 15. The identification of the k_{ax}^{cb} value

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	I_{zi}, cm^4	S_{zi}, cm^3	A_i, cm^2	T_i, degC	y_i, cm	ϕ_{i_i}	a_i	c_i	$b_i, 1/\text{cm}$	d_i, cm	$d_i \cdot S_{zi} + c_i \cdot I_{zi}, \text{cm}^4$	$a_i \cdot S_{zi} + b_i \cdot I_{zi}, \text{cm}^3$
2	28,561	-8,549	2,6148	15,05	-3,8422	0,999654	1,003268	0,998588	0,00076	-0,00676	28,57843568	-8,555222431
3	4,157	-1,675	2,2034	-1,54	-2,3122	0,998492	1,00151	1,00151	0	0	4,16327739	-1,677529379
4	25,809	10,111	4,2183	-1,54	0,9678	0,998492	1,000995	1,003192	0,000532	-0,00163	25,87491747	10,13480088
5				-18,13	3,1578	0,997331						
6	Сумма=	-0,113	9,0365							сумма=	58,61663054	-0,097950933
7		alfa=	0,00007	1/K								
8		Tref=	20	degC								
9		Kсв=	-0,02567	1/m								

Рис. 16. Определение величины $K_{св}$

Fig. 16. The identification of the $K_{св}$ value

	A	B	C
1	ϕ_{i_i}	y_i, cm	σ_{i_i}, MPa
2	0,999654	-3,8422	-0,86655912
3	0,998492	-2,3122	1,212403326
4	0,998492	0,9678	-1,06060356
5	0,997331	3,1578	0,562647794
6	E=	2,70E+09	Pa
7	kax=	0,998348	
8	K=	-0,02567	1/m

Рис. 17. Определение внутренних напряжений

Fig. 17. The identification of internal stresses

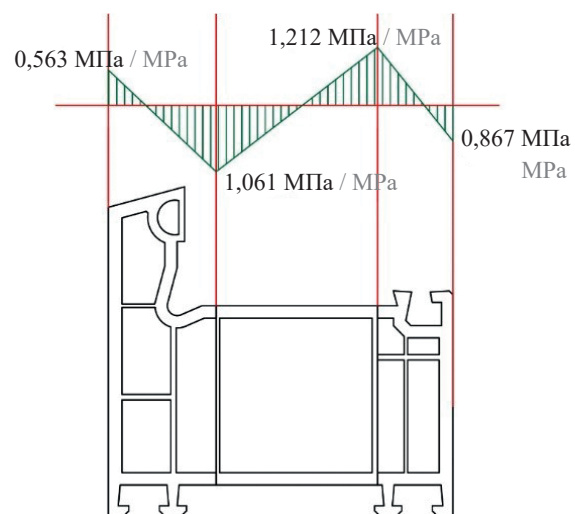


Рис. 18. Результат ручного расчета

Fig. 18. The result of the manual calculation

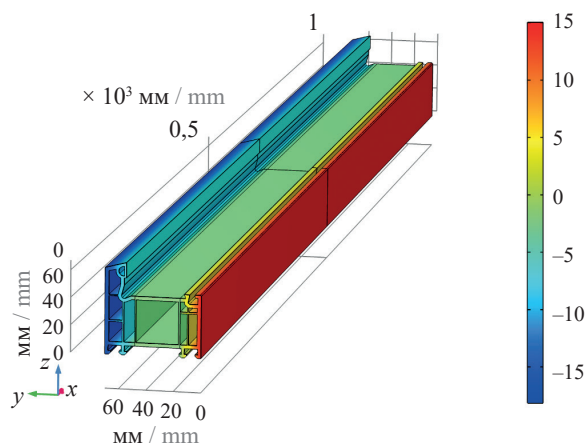


Рис. 19. Трехмерная модель ПВХ-профиля в программе COMSOL Multiphysics и заданное распределение температуры, °C

Fig. 19. A three-dimensional model of a PVC profile made using in the COMSOL Multiphysics software and the pre-set temperature distribution, °C

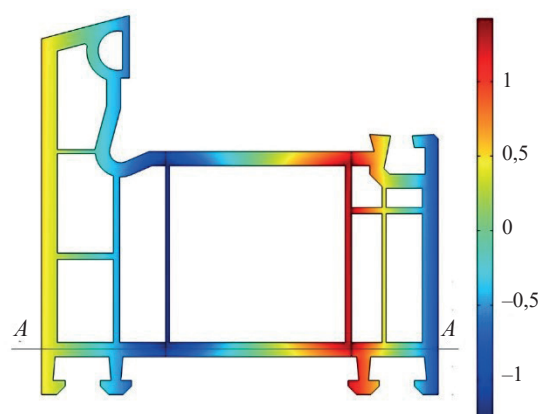


Рис. 20. Результаты расчета в COMSOL Multiphysics. Нормальные напряжения в поперечном сечении профиля, МПа

Fig. 20. Calculation results obtained in COMSOL Multiphysics. Normal stresses in the profile cross section, MPa

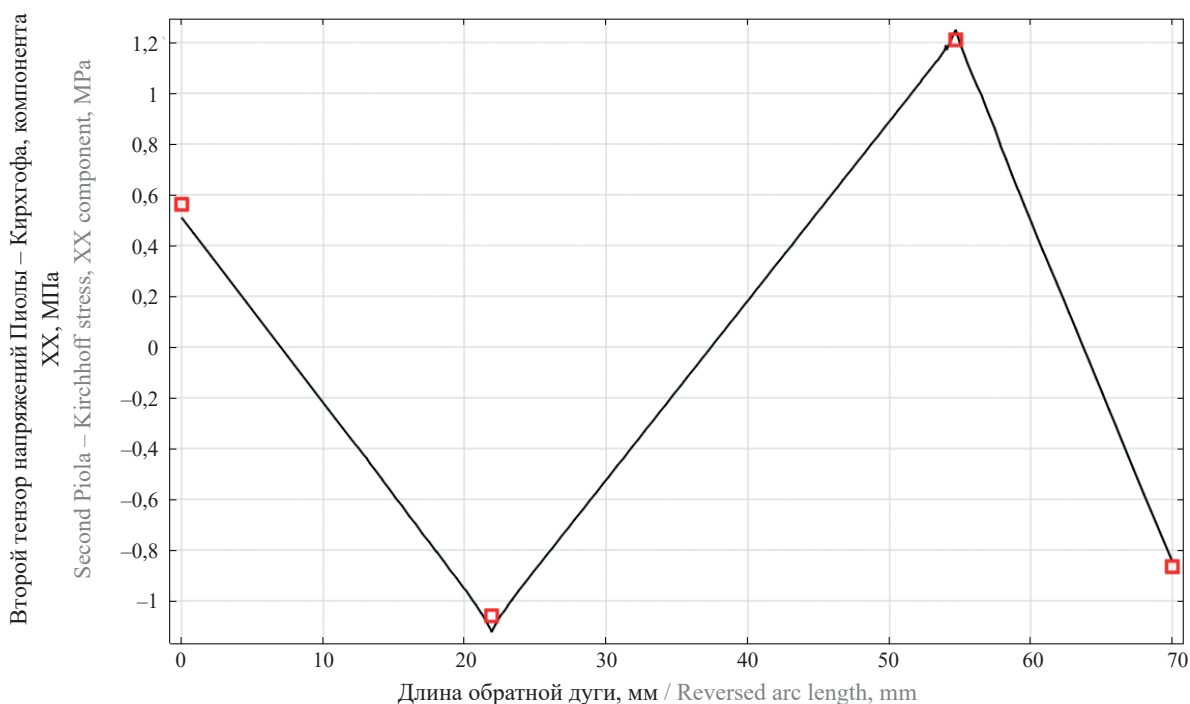


Рис. 21. Нормальные напряжения вдоль линии А-А, МПа. Черной линией показан результат расчета в COMSOL Multiphysics, красными квадратами — результат ручного расчета

Fig. 21. Normal stresses along the A-A line, MPa. The black line shows the result of the calculation made using COMSOL Multiphysics; red squares show the result of the manual calculation

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе:

- проведен расчет трехмерного температурного поля для модели двухстворчатого ПВХ-окна. Результаты расчета показали, что ввиду наличия в центре его профильных элементов армирующего сердечника, распределение температуры в их по-

перечном сечении имеет ступенчатый характер, отличающийся от «классического» вида;

- предложена методика аналитического расчета температурного поля в поперечном сечении оконных профилей ПВХ. Также получены уравнения общего вида, описывающие изгиб оконных профилей с учетом ступенчатого распределения температуры в их поперечном сечении. Справедливость полу-

ченных уравнений была проверена путем сравнения результатов проведенного на их основе расчета с результатами трехмерного конечно-элементного моделирования.

Данная работа является одним из этапов по созданию инженерной методики расчета механической работы оконных конструкций при действии температурных нагрузок, в рамках которой авторы также рассматривают следующие вопросы:

- косой изгиб ПВХ-профиля (этот пункт актуален для ПВХ-профилей с повышенными тепло-техническими характеристиками, для которых на-

блюдается значительная асимметрия поперечного сечения);

- учет наличия армирующего сердечника и его влияния на температурные деформации ПВХ-профиля;

- статическую работу узлов соединений профильных элементов между собой;

- влияние жесткости светопрозрачного заполнения (стеклопакетов) и раскрепления элементами фурнитуры на температурные деформации профильных элементов окна.

Эти вопросы станут предметом исследования в последующих публикациях авторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плотников А.А. Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве стеклянных зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 7–15.
2. Konstantinov A., Mukhin A. Architectural possibilities of using PVC window units in historical buildings // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 04018. DOI: 10.1051/mateconf/201819304018
3. Bursey T., Green G.H. Combined thermal and air leakage performance of double hung windows // ASHRAE Transactions. 1970. Vol. 76. Issue 2. Pp. 215–226.
4. Fleury G., Thomas M. Variation to window air permeability according to outside temperature // Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment. 1972. Issue 132.
5. Elmahdy A.H. Air leakage characteristics of windows subjected to simultaneous temperature and pressure differentials // Conf. Proc. Window Innovations. 1995. Pp. 146–163.
6. Henry R., Patenaude A. Measurements of window air leakage at cold temperatures and impact on annual energy performance of a house // ASHRAE Transactions. 1998. Vol. 104. Issue 1b. Pp. 1254–1260.
7. Шеховцов А.В. Воздухопроницаемость оконного блока из ПВХ профилей при действии отрицательных температур // Вестник МГСУ. 2011. № 3–1. С. 263–269.
8. Верховский А.А., Зимин А.Н., Потапов С.С. Применимость современных светопрозрачных ограждающих конструкций для климатических регионов России // Жилищное строительство. 2015. № 6. С. 16–19.
9. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the negative temperatures influence on the PVC windows air permeability // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 2. P. 022092. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022092
10. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal deformation of window for climatic conditions of Russia // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Issue 3. P. 032048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032048
11. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the wind and temperature loads influence on the PVC windows deformation // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032022. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032022
12. Елдашов Ю.А., Сесюнин С.Г., Ковров В.Н. Экспериментальное исследование типовых оконных блоков на геометрическую стабильность и приведенное сопротивление теплопередаче от действия тепловых нагрузок // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 146–149.
13. Сесюнин С.Г., Елдашов Ю.А. Моделирование сопряженной задачи термоупругости на примере анализа вариантов конструктивного оформления оконного блока зданий // Светопрозрачные конструкции. 2005. № 4.
14. Власенко Д.В. Почему коробит окно. Кто виноват и что делать? // Оконное производство. 2014. № 39. С. 42–44.
15. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Ч. 1. Зимние поперечные деформации // Светопрозрачные конструкции. 2013. № 1–2. С. 6–9.
16. Аксёнов И.С., Константинов А.П. Упрощенный подход к моделированию уплотнителя для прочностного расчета оконных конструкций // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 317–330. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.317-330
17. Константинов А.П. Вопросы расчета оконных блоков из ПВХ на ветровую нагрузку // Перспективы науки. 2018. № 1 (100). С. 26–30.
18. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учебное пособие. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.
19. Лурье А.И. Теория упругости. М. : Наука, 1970. 940 с.
20. Борискина И.В., Шведов Н.В., Плотников А.А. Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий. Справочник проектировщика. Том II. Оконные конструкции из ПВХ. СПб. : НИУПЦ «Межрегиональный институт окна», 2005. 320 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 22 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Сергеевич Аксенов** — преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1037239, Scopus: 57209195917, ResearcherID: AAF-6118-2021, ORCID: 0000-0003-0689-3498; ivanak1995@mail.ru;

Александр Петрович Константинов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 955350, Scopus: 57201183847, ResearcherID: V-2172-2018, ORCID: 0000-0001-6093-8496; apkonst@yandex.ru.

Вклад авторов:

И.С. Аксенов — разработка методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

А.П. Константинов — идея, научное руководство, итоговые выводы, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Plotnikov A.A. Architectural and engineering principles and innovations in the construction of glass-facade buildings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 11:7-15. (rus.).
2. Konstantinov A., Mukhin A. Architectural possibilities of using PVC window units in historical buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:04018. DOI: 10.1051/mateconf/201819304018
3. Bursey T., Green G.H. Combined thermal and air leakage performance of double hung windows. *ASHRAE Transactions*. 1970; 76(2):215-226.
4. Fleury G., Thomas M. Variation to window air permeability according to outside temperature. *Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment*. 1972; 132.
5. Elmahdy A.H. Air leakage characteristics of windows subjected to simultaneous temperature and pressure differentials. *Conf. Proc. Window Innovations*. 1995; 146-163.
6. Henry R., Patenaude A. Measurements of window air leakage at cold temperatures and impact on annual energy performance of a House. *ASHRAE Transactions*. 1998; 104(1b):1254-1260.
7. Shekhovtsov A. Air permeability of an PVC window when exposed to freezing temperatures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-1:263-269. (rus.).
8. Verkhovsky A.A., Zimin A.N., Potapov S.S. The applicability of modern translucent walling for the climatic regions of Russia. *Housing Construction*. 2015; 6:16-19. (rus.).
9. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the negative temperatures influence on the PVC windows air permeability. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 753(2):022092. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022092
10. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal deformation of window for climatic conditions of Russia. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 463(3):032048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032048
11. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the wind and temperature loads influence on the PVC windows deformation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032022. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032022
12. Eldashov Y.A., Sesyunin S.G., Kovrov V.N. Experimental study of typical window blocks on geometric stability and reduced resistance to heat transfer from the action of thermal loads. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 3:146-149. (rus.).
13. Sesyunin S.G., Eldashov Yu.A. Modeling of a thermo elasticity conjugate problem on the example of various variants of window block structural design. *Translucent Structures*. 2005; 4. (rus.).
14. Vlasenko D.V. Why it warps the windows. Who is to blame and what to do? *Window Production*. 2014; 39:42-44. (rus.).
15. Kalabin V.A. Assessment of PVC profile thermal deformation. Part 1. Winter transverse deformations. *Translucent Structures*. 2013; 1-2:6-9. (rus.).
16. Aksenov I.S., Konstantinov A.P. A simplified approach to the window gasket modeling for window strength calculation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):317-330. DOI: 10.22227/19970935.2021.3.317-330 (rus.).
17. Konstantinov A.P. Calculation of PVC window blocks for wind load. *Prospects of Science*. 2018; 1(100):26-30. (rus.).
18. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Material resistance*. Moscow, Nauka, 1986; 560. (rus.).

19. Lur'e A.I. *Solid mechanics*. Moscow, Nauka, 1970; 940. (rus.). *The designer's reference book. Volume II. PVC window structures*. Saint-Petersburg, Interregional Institute of the Window, 2005; 320. (rus.).
20. Boriskina I.V., Shvedov N.V., Plotnikov A.A. *Modern translucent structures of civil buildings*.

Received September 28, 2021.

Adopted in revised form on November 22, 2021.

Approved for publication on November 22, 2021.

B I O N O T E S: **Ivan S. Aksenov** — lecturer of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1037239, Scopus: 57209195917, ResearcherID: AAF-6118-2021, ORCID: 0000-0003-0689-3498; ivanak1995@mail.ru;

Aleksandr P. Konstantinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 955350, Scopus: 57201183847, ResearcherID: V-2172-2018, ORCID: 0000-0001-6093-8496; apkonst@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Ivan S. Aksenov — development of the methodology, writing the source text, final conclusions.

A.P. Konstantinov — conceptualization, scientific guidance, final conclusions, revision of the text.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 626-1/-2

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1452-1461

Исследование резонансных характеристик гидротехнических сооружений и зданий на малоразмерных моделях

Константин Николаевич Макаров, Елена Евгеньевна Юрченко,
Эрик Кайратович Бирюкбаев, Василиса Евгеньевна Юрченко
Сочинский государственный университет (СГУ); г. Сочи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследовались резонансные характеристики гидротехнических сооружений — бетонной буны и ограждающего сооружения искусственного острова, а также здания школы. В условиях динамических воздействий природного или техногенного происхождения любое сооружение допустимо моделировать как механический резонатор. Модели были изготовлены из материалов, обладающих электроупругими свойствами. Это позволяет измерять их реакции на вынужденные колебания по изменению переменного электрического поля с последующим пересчетом в физические характеристики.

Материалы и методы. Физические малоразмерные модели сооружений изготовлены из электроупругих материалов: органического стекла и пластика ABS — материала 3D-принтеров. Испытания проводились на лабораторной установке, содержащей: генератор колебаний, компьютер, работающий в режиме осциллографа. Математическое моделирование осуществлялось в программном комплексе SolidWorks. Определялись формы колебаний и реакции сооружений с разными амплитудами откликов. Модели сооружений исследовались в разных условиях — при защемлении и свободном опирании.

Результаты. Установлено, что частоты первой формы колебаний защемленной модели соответствуют четвертой форме модели при свободном опирании. Показана взаимная корреляция частот собственных колебаний малоразмерных моделей из пластика ABS и оргстекла.

Выводы. Выявлена возможность применения пластика ABS для создания малоразмерных физических моделей зданий и сооружений при установлении резонансных частот прототипов. Разработана методика комплексного физического и математического моделирования с использованием программного комплекса SolidWorks. Методика позволяет определять резонансные, наиболее опасные частоты колебаний сооружений. Использование различных вариантов опирания сооружений дает возможность применить геометрический масштаб для получения резонансных частот при переносе результатов с малоразмерного моделирования в натуру и тем самым выявить их уязвимость к динамическим воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малоразмерные модели, электроупругие материалы, динамические воздействия, генератор колебаний, амплитуды откликов, резонансные частоты, физическое моделирование, программа SolidWorks

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макаров К.Н., Юрченко Е.Е., Бирюкбаев Э.К., Юрченко В.Е. Исследование резонансных характеристик гидротехнических сооружений и зданий на малоразмерных моделях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1452–1461. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1452-1461

Автор, ответственный за переписку: Константин Николаевич Макаров, ktk99@mail.ru.

A study on resonance characteristics of hydraulic structures and buildings conducted using small-size models

Konstantin N. Makarov, Elena E. Yurchenko, Eric K. Biryukbaev, Vasilisa E. Yurchenko
Sochi State University (SSU); Sochi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study focuses on resonance characteristics of a hydraulic engineering structure, such as a groin, land retention works on an artificial island, and a school building. Any structure, exposed to dynamic effects of natural or man-induced origin, can be validly simulated as a mechanical resonator. Models are made of materials that have electro-elastic properties allowing to measure responses to induced oscillations, or changes in an alternating electric field, and reevaluate the physical characteristics later.

Materials and methods. Small-size physical models of structures are made of electro-elastic materials, such as organic glass and ABS plastic, used for 3D printing. A laboratory test bench, composed of an oscillator and a personal computer, used as an oscillograph, was applied to conduct the testing. Mathematical modeling was performed using SolidWorks software packages. Oscillation modes and structural responses, featuring different response amplitudes, were identified. Models of structures were studied in different contexts, including restraint and free bearing.

Results. It has been found that frequencies of the first mode of oscillations in a restrained model correspond to the fourth

mode of a model in case of free bearing. Mutual correlation of eigenfrequencies of oscillations in small-size models, made of ABS plastic and organic glass, is demonstrated.

Conclusions. The applicability of ABS plastic as the material of small-size physical models of buildings and structures has been proven for the purpose of identifying resonance frequencies of the prototypes. The co-authors have developed an integrated physical and mathematical modeling method that entails the use of SolidWorks software packages. This method allows to identify resonance frequencies, which are most dangerous for structures. Different structure support patterns allow to apply the geometric scale to obtain resonance frequencies when translating small-size model results to natural values and, hence, identify the vulnerability of structures to dynamic effects.

KEYWORDS: small-size models, electro-elastic materials, dynamic effects, oscillator, response amplitudes, resonance frequencies, physical modeling, SolidWorks software

FOR CITATION: Makarov K.N., Yurchenko E.E., Biryukbaev E.K., Yurchenko V.E. A study on resonance characteristics of hydraulic structures and buildings conducted using small-size models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1452-1461. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1452-1461

Corresponding author: Konstantin N. Makarov, ktk99@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Исследовались резонансные характеристики гидротехнических сооружений — бетонной буны и оградительного сооружения искусственного острова, а также здания школы (рис. 1).

Физическое моделирование выполнялось на малоразмерных моделях на специально разработанной лабораторной установке, математическое — в программном комплексе (ПК) SolidWorks (студенческая версия, серийный № 9020 0049 6400 8817 598Z NJD6, 2020 г.) [1–13]. Программный комплекс позволяет оценивать резонансные явления по амплитудно-частотному спектру отклика объекта исследования на внешние воздействия и выделять формы колебаний, вызывающих наибольшие деформации сооружений.

В физических экспериментах последовательность реакции моделируемых объектов на генерируемые частоты дает возможность получать их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) с широкими основаниями, сужающимися к резким пикам. Данные физического моделирования использовались для калибровки математических моделей, создаваемых в ПК. Это позволило на основе комплексного моделирования решить следующие задачи:

- обосновать применение электроупругих материалов, доступных для изготовления моделей на 3D-принтерах, — пластика ABS и оргстекла для имитации бетона [14];

- разработать технологию использования сменных датчиков для определения реакций элементов моделей из стальных и электроупругих материалов;
- обосновать заземление элементов конструкций в основании из морского песка;
- обосновать применение в испытательных установках диффузоров разных мощностей для генерации колебаний сооружений в условиях распространения звуковых волн в средах, имеющих разные акустические импедансы [10–17];
- создать методику масштабирования значений собственных частот колебаний сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторная установка состоит из следующих элементов (рис. 2, 3):

1. Генератор синусоидальных волн.
2. Микрофонный усилитель низких частот.
3. Компьютер — осциллограф. Частотная характеристика звуковой карты компьютера 20–20 000 Гц. Сигналы обрабатываются программой SpectraLab с амплитудой измерений от единиц микровольт до десятков милливольт.
4. Емкость с дистиллированной водой (5 л) и морским песком 5 кг с вмонтированным в торец (параллельно основаниям моделей сооружений) диффузором марки 10ГДН-1.4. Максимальное перемещение диффузора составляло 8 мм на резонансных частотах 80–100 Гц. В емкости последовательно испытывались модели следующих сооружений:

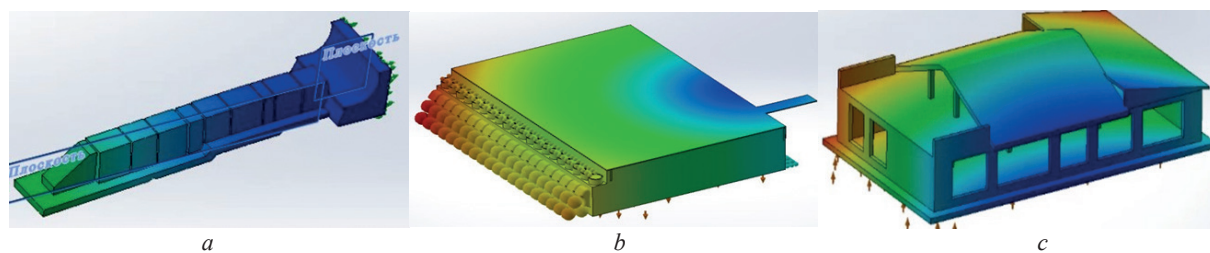


Рис. 1. Отображение математических моделей: *a* — буна $23 \times 4 \times 3$ (h) см; *b* — остров с оградительными сооружениями $23 \times 25,5 \times 5$ (h) см; *c* — школа с каркасом и наружными стенами $16 \times 10 \times 4,5$ (h) см

Fig. 1. A representation of mathematical models: *a* — a groin, $23 \times 4 \times 3$ cm; *b* — an island and land retention works, $23 \times 25.5 \times 5$ cm; *c* — a school building, its frame and external walls, $16 \times 10 \times 4.5$ cm

- 1) буна из оргстекла в масштабе 1:150;
- 2) буна из пластика ABS в масштабе 1:150;
- 3) искусственный остров из морского песка с оградительными сооружениями из оргстекла, пластика ABS, стальных оболочек и пластин, имитирующих шпунт в масштабе 1:1000.
5. Картонный короб с расположенным под ним (перпендикулярно основанию модели здания)

диффузором марки 4ГД-28 и морским песком. Диффузор размещен в корпусе акустической системы с открытой задней стенкой и боковыми стенками высотой 10 см. Максимальное перемещение диффузора — 3,68 мм на резонансных частотах ниже 63 Гц. В коробе испытывалась модель здания школы из пластика ABS в масштабе 1:200.

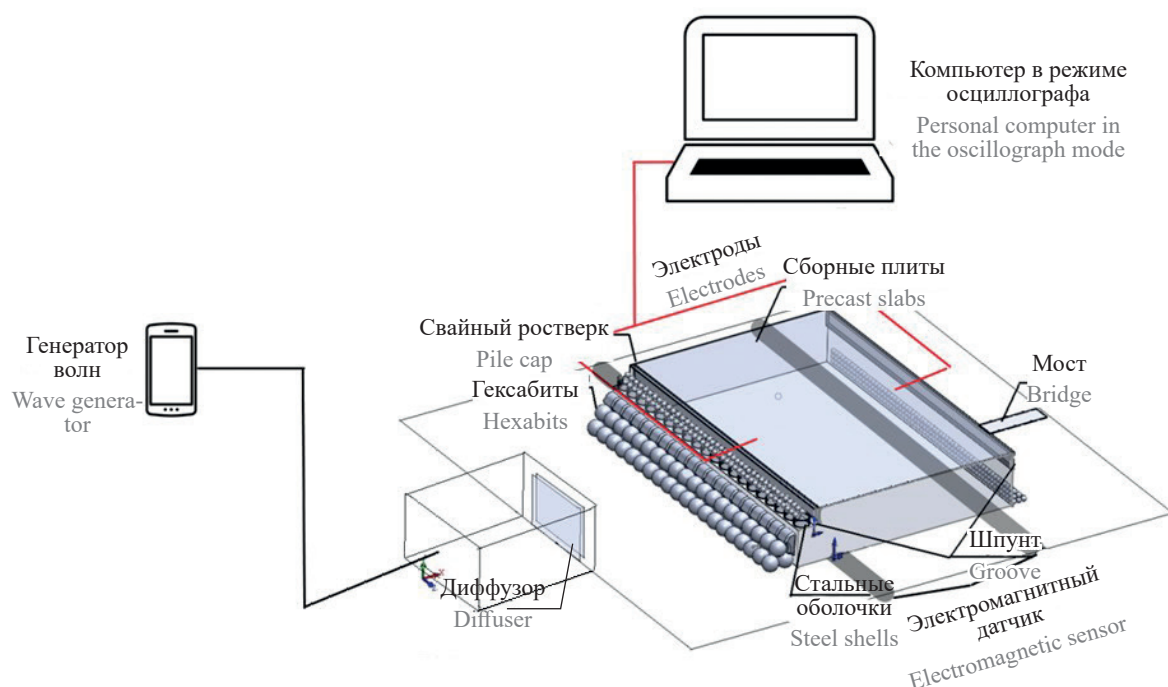


Рис. 2. Емкость с вмонтированным в торец диффузором марки 10ГДН-1.4 параллельно основанию моделей гидротехнических сооружений

Fig. 2. A tank with a 10GDN-1.4 diffuser built in the butt end parallel to the base of models of hydraulic structures

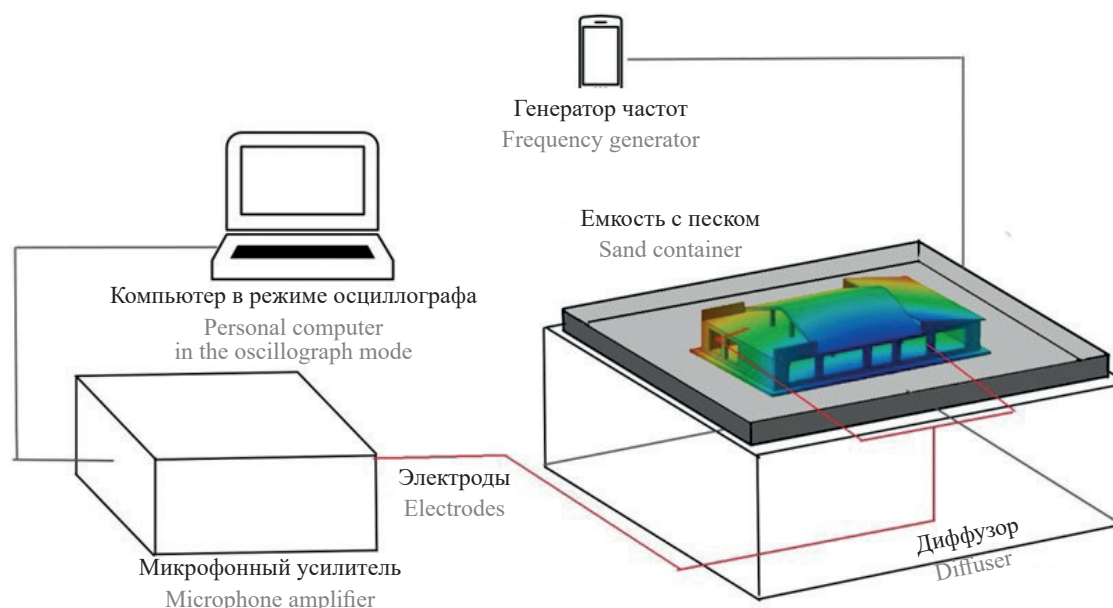


Рис. 3. Картонный короб с расположенным под ним диффузором марки 4ГД-28 перпендикулярно основанию модели здания школы

Fig. 3. A cardboard box and a 4GD-28 diffuser under it which are perpendicular to the base of a school building model

6. Сменные датчики в виде двух пар электродов при двухканальном съеме данных с электроупругих элементов и электромагнитного измерителя сигнала при одноканальном режиме для стальных элементов моделей. Для максимального учета реакций сооружений предусмотрено размещение датчиков по длине моделей 1, 2, 4 — в двух точках, а для модели 3 — в четырех точках измерений по длине модели. Датчики регистрировали амплитуды колебаний элементов из электроупругих материалов — оргстекла и пластика ABS по обоим каналам одновременно, а электромагнитный датчик располагался по длине модели в нижней части (под емкостью) и регистрировал амплитуды колебаний элементов из стали по одному каналу в последовательном режиме.

Приложение синусоидальной гармонической нагрузки в режиме установившихся колебаний при физическом моделировании определяет уникальную для заданной конструкции структуру ее деформаций при соответствующей частоте возбуждения, а регистрируемая осциллографом реакция конструкции в резонансе является максимальной.

В среде воздух-вода механические колебания передаются моделям от генератора синусоидальных электрических колебаний, усиленных при помощи усилителя низкой частоты, нагруженного на динамическую головку. Она преобразует синусоидальные электрические колебания в механические колебания диффузора. Эти колебания передаются в водной и воздушной среде. Механические колебания воспринимаются исследуемыми моделями. Электроупругие и электромагнитные свойства материалов моделей позволяют преобразовывать их механические колебания в электромагнитные и измерять механические

деформации за счет изменения переменного электрического и магнитного поля [18, 19].

Таким образом, модели сооружений рассматриваются как механические резонаторы [14, 19–22], способные преобразовывать электрические колебания в механические, а затем назад в электрические.

В математической модели как для имитации проведенного физического эксперимента, так и для расчета полномасштабного сооружения изучался динамический отклик конструкции в форме определенной моды его колебаний. В программе SolidWorks имеется функция выделения резонансных частот с максимальными амплитудами, что дает возможность определить волновые воздействия, наиболее опасные для сооружений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [21] показана хорошая корреляция частот колебаний малоразмерной модели здания из пластика ABS с моделью из оргстекла, применяемого для имитации конструкций из бетона. Результаты, описанные в работе [22], учтены при изготовлении бетонных элементов всех моделей в данном исследовании и подтверждены полученными значениями резонансных частот (табл. 1).

Поскольку в модели 3 имелись стальные элементы (оболочки и шпунт), то для регистрации их колебаний вместо двух пар электродов в нижней части емкости с водой устанавливался электромагнитный измеритель сигнала. Таким образом, регистрация колебаний модели 3 происходила в четырех точках измерения, что позволило получить при физическом моделировании объемную конфигурацию деформации конструкции, представленную на рис. 4.

Табл. 1. Резонансные частоты моделей

Table 1. Resonance frequencies of models

Наименование модели Model name	Резонансная частота, Гц (физическая модель) Resonance frequency, Hz (physical model)	Резонансная частота, Гц (математическая модель) Resonance frequency, Hz (mathematical model)
Модель 1 (буна из оргстекла) Model 1 (an organic glass groin)	80–110	98–373 (2–4 формы колебаний) 98–373 (2–4 oscillation modes)
Модель 2 (буна из пластика ABS) Model 2 (an ABS plastic groin)	70–110	88–339 (2–4 формы колебаний) 88–339 (2–4 oscillation modes)
Модель 3 (остров из морского песка) Model 3 (an island made of sea sand)	Испытания не проводились No testing	0–27 (1–4 формы колебаний) 0–27 (1–4 oscillation modes)
Модель 3 (остров с оградительными сооружениями — морской песок, оргстекло, пластик ABS, сталь) Model 3 (an island with land retention works — sea sand, organic glass, ABS plastic, steel)	30, 50, 100, 200	0–0,011 (1–4 форма колебаний) 27 (15 форма колебаний) 0–0,011 (1–4 oscillation mode) 27 (15 27 (15 oscillation mode)
Модель 4 (школа из пластика ABS) Model 4 (school building model made of ABS plastic)	40–1000	400–1000 (1–4 форма колебаний при заземлении) 400–803 (4–6 форма колебаний при роликах-ползунах) 400–1000 (1–4 oscillation mode in case of restraint) 400–803 (4–6 oscillation mode in case of roller sliders)



Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики физической модели острова с оградительными сооружениями

Fig. 4. Amplitude and frequency characteristics of the physical model of an island with land retention works

Как видно из рис. 4, резонансные частоты с морской стороны низа оградительного сооружения (оболочки и шпунта) — 50 Гц, верха с той же стороны (ростверк) — 30, 100 и 200 Гц, со стороны берега низ сооружений (шпунт) — 120 Гц, верх (подпорная стена) — 30, 100 и 200 Гц. Значения резонансных амплитуд — наименьшие внизу конструкции острова с морской стороны (низ оболочки, шпунт) 10,15 дБ, наибольшие — вверху конструкции острова с морской стороны 23,4 дБ, изменений конфигурации не наблюдалось.

Вклад каждого из элементов оградительного сооружения в общую картину деформаций исследовался в программе SolidWorks с использованием генератора частотного анализа. Результаты приведены в табл. 2 и на рис. 5.

В экспериментах основанием моделей, имеющих разный масштаб, служил морской песок крупностью 1–1,5 мм. Защемление модели 4 — здание школы (масштаб 1:200) — в основании производилось пригрузкой уступов фундаментной плиты этим же песком. Поскольку тело острова в модели 3 (мас-

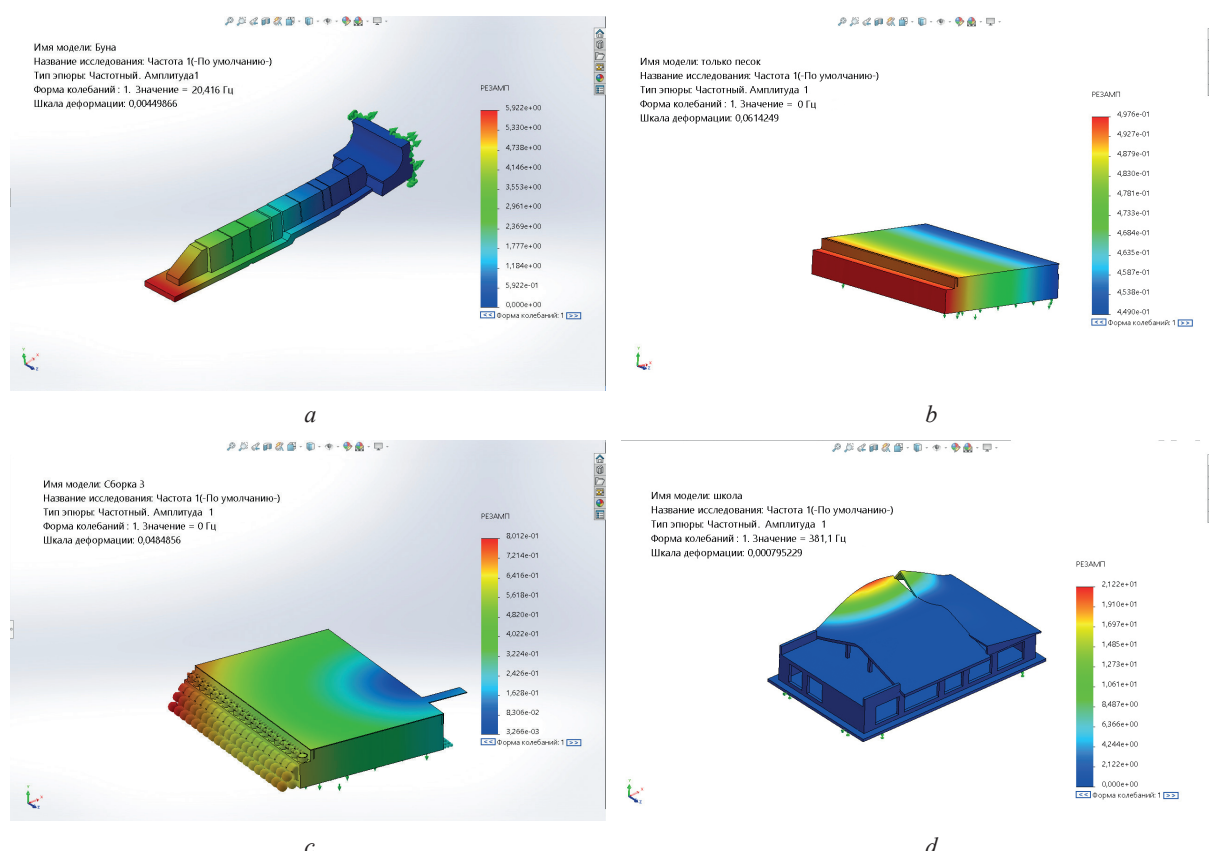


Рис. 5. Отображение результатов математического моделирования: а — буна; б — остров без оградительных сооружений; в — остров с оградительными сооружениями; д — школа с каркасом и наружными стенами

Fig. 5. Mathematical modeling results: a — a groin; b — an island without land retention structures; в — an island with land retention structures; д — a school building with a frame and external walls

Табл. 2. Формы и частоты колебаний модели острова в программе SolidWorks

Table 2. Modes and frequencies of oscillations of an island model in the SolidWorks software

Наименование элемента острова от моря к берегу Island element from the sea to the shore	Резонансная форма колебания Resonance oscillation mode	Частота колебания, Гц Oscillation frequency, Hz
Конструкция в целом The entire structure	3	0,001
Наброска из крупного морского песка Coarse sea sand talus	4	0,011
Стальные оболочки Steel shells	5	0,031
Ростверк со сваями между оболочками из пластика ABS Pile cap in-between plastic shells	7	0,071
Стальной шпунт со стороны моря Steel groove on the side of the sea	6	0,040
Тело острова из морского песка, накрытое плитой из оргстекла The body of an artificial island made of sea sand and covered with an organic glass plate	15	27
	17	32

штаб 1:1000) само выполнено из морского песка, то защемление необходимо только для конструкций из стальных оболочек. Они погружались в грунт на 1/3 длины. Такие опорные условия с учетом разных масштабов моделей учитывались в программе SolidWorks в двух вариантах:

- 1) множество жестких опор;
- 2) множество роликов-ползунов.

В табл. 3 представлены вычисленные частоты собственных колебаний малоразмерной модели 4 — здание школы, выполненной из пластика ABS при этих опорных условиях. Модель реализована каркасной с наружными стенами.

Как видно из табл. 3, частоты 1-й формы колебаний защемленной модели соответствуют 4-й форме модели на роликах.

Масштабирование значений собственных частот с полномасштабными конструктивными схемами произведено так же для здания школы в численном эксперименте в программе SolidWorks. При этом из конструктивной схемы были исключены наружные стены и кровля, участвующие как в физической модели 4, так и в ее численной модели, представленной в табл. 3. В расчетах учтены модуль Юнга и коэффициент Пуассона для бетона с целью сравнения значений для конструкции в масштабах 1:200 и 1:1. Результаты масштабирования частот представлены в табл. 4 и на рис. 6.

Как видно из табл. 4, наличие данных для различных вариантов опорных условий дает возможность использования знаменателя масштаба геометрических размеров модели для вычисления частот колебаний полномасштабных их прототипов.

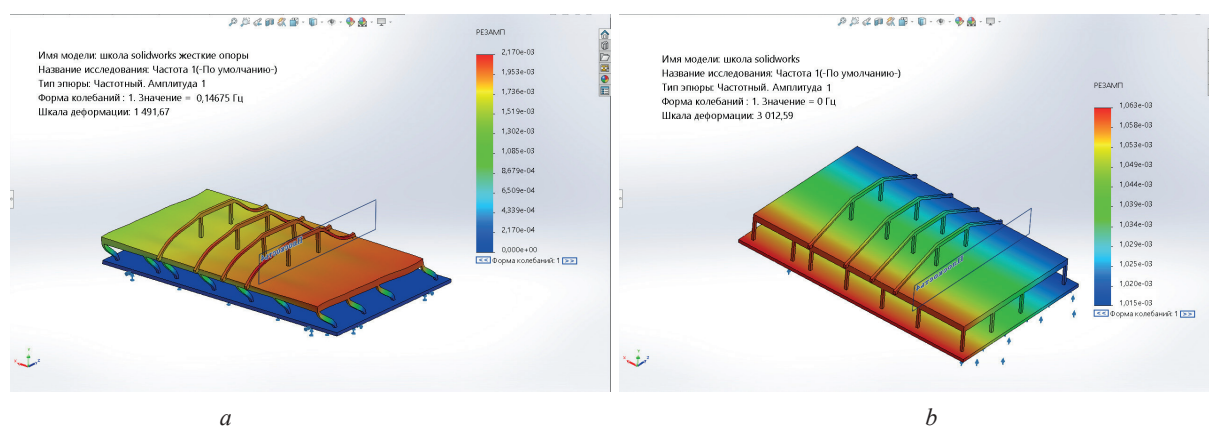
Табл. 3. Частоты собственных колебаний модели 4 (здание школы из пластика ABS) с разными опорными условиями

Table 3. Frequencies of eigen-oscillations of model 4 (school building made of ABS plastic) with different reference conditions

Номер формы колебаний Oscillation mode number	Защемление, Гц Restraint, Hz	Ролики-ползуны, Гц Roller sliders, Hz
1	381	0
2	740	0
3	803	0,002
4	1106	381
5	1229	743
6	1289	803
7	1396	1210
8	1423,7	1327
9	1515,4	1392
10	1556,6	1508
11	1720,3	1552

Табл. 4. Частоты собственных колебаний модели 4 (здание школы) при защемлении в морском песке и опирании на ролики-ползуны**Table 4.** Frequencies of eigen-oscillations of model 4 (school building) restrained in the sea sand and supported by slide rollers

Номер формы колебаний Oscillation mode number	Масштаб 1:200 1:200 scale		Масштаб 1:1 1:1 scale	
	Частота при защемлении, Гц Frequency in case of restraint, Hz	Частота при роликах-ползунах, Гц Frequency in case of slide rollers, Hz	Частота при защемлении, Гц Frequency in case of restraint, Hz	Частота при роликах-ползунах, Гц Frequency in case of slide rollers, Hz
1	34	0	0,146	0
2	38	0	0,163	1,21e-0,7
3	42	0,0002	0,183	8,58e-0,7
4	81	44	0,243	0,178
5	82	49	0,245	0,197
6	84	54	0,247	0,221
7	87	81	0,260	0,246
8	93	82	0,339	0,243
9	94	84	0,361	0,247
10	105	87	0,388	0,262
11	107	93	0,391	0,339

**Рис. 6.** Полномасштабные модели здания школы в каркасе: *a* — при защемлении в основании; *b* — при креплении на основание роликов-ползунов**Fig. 6.** Full-scale models of a school building in the frame: *a* — if restrained in the base; *b* — if roller-sliders are attached to the base

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На специально разработанной лабораторной установке выполнено качественное физическое моделирование малоразмерных моделей сооружений из электроупругих материалов 3D-принтеров и оргстекла с определением и визуализацией их реакций на волновые динамические воздействия.

Показана хорошая корреляция частот колебаний малоразмерной модели здания из пластика ABS с моделью из оргстекла, применяемого для имитации конструкций из бетона.

Получены зависимости реакций физических моделей от жесткости конструкций и узлов ее соединений, условий опирания. Частоты 1-й формы колебаний защемленной модели соответствуют 4-й форме модели при свободном опирании.

Моделирование собственных частот колебаний сооружений в программе SolidWorks подтверждает эффективность применения физического моделирования и позволяет производить масштабирование для прототипов исследуемых сооружений.

Масштабирование значений собственных частот с полномасштабными конструктивными схемами произведено в численном эксперименте в программе SolidWorks.

Использование различных вариантов опирания сооружений дает возможность применить геометрический масштаб для получения резонансных частот при переносе результатов с малоразмерного моделирования в натуру и тем самым выяснить их уязвимость к динамическим воздействиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chugh A.K. Natural vibration characteristics of gravity structures // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2007. Vol. 31. Issue 4. Pp. 607–648. DOI: 10.1002/nag.552

2. Jafari M.K., Davoodi M. Dynamic characteristics evaluation of masjed-soleiman embankment dam using forced vibration test // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004. P. 2218.
3. Ewins D.J. Modal testing: theory, practice and application. 2nd ed. Philadelphia, PA, Research Studies Press, 2000. 574 p.
4. Bourell D., Kruth J.P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A.M. et al. Materials for additive manufacturing // CIRP Annals. 2017. Vol. 66. Issue 2. Pp. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
5. Bourell D.L. The evolution of materials for additive manufacturing // 4-th International Conference on Additive Technologies. Maribor, Slovenia, 2012. 10 p.
6. Bourell D.L. Perspectives on additive manufacturing // Annual Review of Materials Research. 2016. Vol. 46. Issue Pp. 1–18. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031606
7. Кулик К.Н., Семенов С.Я., Марченко С.С., Никитин К.С. Анализ методов моделирования напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений мелиоративного назначения с использованием вычислительных систем // Экология и строительство. 2018. № 1. С. 21–26. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-00004
8. Абдикаримов Р.А., Эшматов Х., Бобаназаров Ш.П., Ходжаев Д.А., Эшматов Б.Х. Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 59–70.
9. Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений // Наука и безопасность. 2015. № 2 (15). С. 2–16.
10. Колесников Ю.И., Медных Д.А. О некоторых особенностях распространения акустических волн во влажном песке // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 69–74.
11. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Упругие волны в пьезоэлектрических слоистых структурах // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2012. № 5 (2). С. 164–186.
12. Суржиков А.П. Определение скорости распространения звука в металлических и неметаллических материалах. Томск, 2018. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/1/LEX-K/lessons/UT/Metodich/Speed.PDF>
13. Ахрамочкина Т.И. Экспериментальные исследования силы сцепления стальной оцинкованной пластины и бетона // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1
14. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities // Dental materials: official publication of the Academy of Dental Materials. 2015. Vol. 32. Issue 1. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018
15. Alabi A., Enikanselu P.A. Integrating seismic acoustic impedance inversion and attributes for reservoir analysis over 'DJ' Field, Niger Delta // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. Vol. 9. Issue 3. DOI:10.1007/s13202-019-0720-z
16. Tarrazó-Serrano D., Pérez-López S., Candelas P., Uris A., Rubio C. Acoustic focusing enhancement in fresnel zone plate lenses // Scientific Report. 2019. Vol. 9. Issue 1. P. 7067. DOI: 10.1038/s41598-019-43495-x
17. Veneziani G.R., Correa E.L., Potiens M., Campos L.L. Attenuation coefficient determination of printed ABS and PLA samples in diagnostic radiology standard beams // Journal of Physics Conference Series. 2016. Vol. 733. Issue 1. P. 012088. DOI: 10.1088/1742-6596/733/1/012088
18. Minin I., Minin O. Mesoscale acoustical cylindrical superlens // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 155. P. 01029. DOI: 10.1051/mateconf/201815501029
19. Yang W.D., Li Y. Sound absorption performance of natural fibers and their composites // Science China Technological Sciences. 2012. Vol. 55. Issue 8. DOI: 10.1007/s11431-012-4943-1
20. Patrick R. Characterization and analysis of the Bulk-Acoustic-Wave Thin Film Resonator in sub-nanogram mass detection // Retrospective Theses and Dissertations. Iowa State University Ames, Iowa, 1991. 104 p. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=17962&context=rttd>
21. Vašina M., Monkova K., Monka P.P., Kozak D. Study of the sound absorption properties of 3D-printed open-porous ABS material structures // Polymers. 2020. Vol. 12. Issue 5. P. 1062. DOI: 10.3390/polym12051062
22. Makarov K.N., Yurchenko E.A., Yurchenko E.E. Application of additive technology for the study of resonance oscillations in structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. Issue 65. P. 04001. DOI: 10.1051/mateconf/201825104001

Поступила в редакцию 17 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 1 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Николаевич Макаров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; РИНЦ ID: 133366, Scopus: 70006042633, ORCID: 0000-0002-6175-3618; ktk99@mail.ru;

Елена Евгеньевна Юрченко — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; РИНЦ ID: 487674; wsonormalno@yandex.ru;

Эрик Кайратович Бирюкбаев — аспирант кафедры строительства; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; ora54321@bk.ru;

Василиса Евгеньевна Юрченко — магистрант кафедры строительства; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; wsonormalno@yandex.ru.

Вклад авторов:

Макаров К.Н. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Юрченко Е.Е. — лабораторная установка, лабораторные исследования, подготовка таблиц, графиков, итоговые выводы.

Бирюкбаев Э.К. — математическое моделирование, обработка результатов, подготовка текста статьи.

Юрченко В.Е. — лабораторные исследования, подготовка графиков, таблиц, рисунков, текста статьи.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chugh A.K. Natural vibration characteristics of gravity structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2007; 31(4):607-648. DOI: 10.1002/nag.552
2. Jafari M.K., Davoodi M. Dynamic characteristics evaluation of masjed-soleiman embankment dam using forced vibration test. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004; 2218.
3. Ewins D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. 2nd ed. Philadelphia, PA, Research Studies Press, 2000; 574.
4. Bourell D., Kruth J.P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A.M. et al. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*. 2017; 66(2):659-681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
5. Bourell D.L. The Evolution of Materials for Additive Manufacturing. *4th International Conference on Additive Technologies*. Maribor, Slovenia, 2012; 10.
6. Bourell D.L. Perspectives on Additive Manufacturing. *Annual Review of Materials Research*. 2016; 46(1):1-18. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031606
7. Kulik K.N., Semenenko S.Y., Marchenko S.S., Nikitin K.S. Analysis of modeling methods of the stress-strain state of the hydraulic structures for reclamation purposes with applying computer systems. *Ecology and Construction*. 2018; 1:21-26. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-00004 (rus.).
8. Abdikarimov R.A., Eshmatov H., Bobanazarov Sh.P., Hodzhaev D.A., Eshmatov B.H. Mathematical modeling and calculation of hydraulic structures of the plate dam type taking into account seismic load and hydrodynamic pressure of water. *Engineering and Construction Journal*. 2011; 3(21):59-70. (rus.).
9. Kantarzhii I.G., Mordvinov K.P. Numerical and physical modeling at the Moscow State University of Offshore Port Hydraulic Engineering Facilities. *Science and Security*. 2015; 2(15):2-16. (rus.).
10. Kolesnikov Yu.I., Mednykh D.A. On some features of acoustic wave propagation in wet sand. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2004; 7(1):69-74. (rus.).
11. Burkov S.I., Sorokin B.P. Elastic waves in piezoelectric layered structures. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2012; 5(2):164-186. (rus.).
12. Surzhikov A.P. *Determination of the speed of sound propagation in metal and non-metal materials*. Tomsk, 2018. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/I/LEX-K/lessons/UT/Metodich/Speed.PDF> (rus.).
13. Akhramochkina T.I. Experimental studies of the adhesion force between a zinc-coated steel plate and concrete. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):1-16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1 (rus.).
14. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental materials: official publication of the Academy of Dental Materials*. 2015; 32(1). DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018
15. Alabi A., Enikanselu P.A. Integrating seismic acoustic impedance inversion and attributes for reservoir analysis over 'DJ' Field, Niger Delta. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019; 9(3). DOI:10.1007/s13202-019-0720-z
16. Tarrazó-Serrano D., Pérez-López S., Candelas P., Uris A., Rubio C. Acoustic Focusing Enhancement in Fresnel Zone Plate Lenses. *Scientific Report*. 2019; 9(1):7067. DOI: 10.1038/s41598-019-43495-x
17. Veneziani G.R., Correa E.L., Potiens M., Campos L.L. Attenuation coefficient determination of printed ABS and PLA samples in diagnostic radiology standard beams. *Journal of Physics Conference*

Series. 2016; 733(1):012088. DOI: 10.1088/1742-6596/733/1/012088

18. Minin I., Minin O. Mesoscale acoustical cylindrical superlens. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 155:01029. DOI: 10.1051/mateconf/201815501029

19. Yang W.D., Li Y. Sound absorption performance of natural fibers and their composites. *Science China Technological Sciences*. 2012; 55(8). DOI: 10.1007/s11431-012-4943-1

20. Patrick R. Characterization and analysis of the Bulk-Acoustic-Wave Thin Film Resonator in sub-nanogram mass detection. *Retrospective Theses*

and Dissertations. Iowa State University Ames, Iowa, 1991; 104. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=17962&context=rtd>

21. Vašina M., Monkova K., Monka P.P., Kozak D. Study of the sound absorption properties of 3D-printed open-porous ABS material structures. *Polymers*. 2020; 12(5):1062. DOI: 10.3390/polym12051062

22. Makarov K.N., Yurchenko E.A., Yurchenko E.E. Application of additive technology for the study of resonance oscillations in structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251(65):04001. DOI: 10.1051/mateconf/201825104001

Received October 17, 2021.

Adopted in revised form on November 1, 2021.

Approved for publication on November 8, 2021.

B I O N O T E S : **Konstantin N. Makarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; ID RISC: 133366, Scopus: 70006042633, ORCID: 0000-0002-6175-3618; ktk99@mail.ru;

Elena E. Yurchenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; ID RISC: 487674; wsonormalno@yandex.ru;

Erik K. Biryukbaev — postgraduate of the Department of Construction; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; opa54321@bk.ru;

Vasilisa E. Yurchenko — master of the Department of Construction; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; wsonormalno@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Makarov K.N. — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Yurchenko E.E. — laboratory installation, laboratory studies, preparation of tables, graphs, final conclusions.

Biryukbaev E.K. — mathematical modeling, results processing, preparation of the text of the article.

Yurchenko V.E. — laboratory studies, preparation of graphs, tables, figures, preparation of the text of the article.

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях

Виталий Иванович Колчунов^{1,3}, Павел Анатолиевич Кореньков², Фан Динь Гуок³

¹ Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия;

² Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); г. Симферополь, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост количества отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам конструктивной безопасности и живучести зданий и сооружений, отражает большой интерес к исследованию проблемы защиты несущих систем от прогрессирующего обрушения. Актуальность таких исследований обусловлена постоянным увеличением на здания и сооружения воздействий техногенного, природного и террористического характера, в связи с этим определяющим фактором является расширение экспериментальных и теоретических исследований обеспечения требуемого уровня живучести несущих систем при таких особых воздействиях и создание способов защиты от прогрессирующего обрушения.

Материалы и методы. Приведены новые результаты экспериментального изучения моделей фрагмента многоэтажного здания, выполненного из монолитного железобетона, узлы сопряжения ригеля и колонны которого усилены сетками косвенного армирования на эксплуатационную статическую нагрузку и аварийное особое воздействие, вызванное внезапным выключением из работы несущей системы одной из колонн первого этажа.

Результаты. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости железобетонных рам-фрагментов каркасов многоэтажных зданий из монолитного железобетона, узлы которых усилены косвенным армированием. Данные о силовом сопротивлении конструкций получены при статическом нагружении конструкции эксплуатационной нагрузкой и особом аварийном воздействии, вызванном мгновенным удалением одной из колонн первого этажа. Выполнен сопоставительный анализ динамики образования, развития и раскрытия трещин. Произведена критериальная оценка параметров предельных и запредельных состояний, а также элементов конструктивных систем с узлами, усиленными сетками косвенного армирования, и без него.

Выводы. Установлен характер действительного деформирования и разрушения элементов несущей системы, узлы которой усилены косвенным армированием. Экспериментально установлены основные свойства элементов конструкций, которые позволяют производить более строгую оценку деформативности и несущей способности влияния косвенного армирования на сопротивление конструктивных систем в запредельных состояниях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, железобетонные конструкции, косвенное армирование, динамическое догружение, живучесть, особое предельное состояние, физическая нелинейность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колчунов В.И., Кореньков П.А., Фан Динь Гуок. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1462–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472

Автор, ответственный за переписку: Павел Анатолиевич Кореньков, kpa_gbk@mail.ru.

A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts

Vitaly I. Kolchunov^{1,3}, Pavel A. Korenkov², Phan Dinh Quoc³

¹ Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation;

² V.I. Vernadsky Crimean Federal University (CFU); Simferopol, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The increasing number of domestic and foreign publications on structural safety and survivability of buildings and structures evidences a great interest in the study of the problem of protecting bearing systems from progressive collapse. The relevance of these studies is determined by the ongoing rise in the number of man-induced, natural and terrorist impacts

on buildings and structures. In this regard, the decisive factor is the expansion of experimental and theoretical studies, focused on ensuring the required level of survivability of bearing systems under such special impacts and, respectively, developing methods for protection from progressive collapse.

Materials and methods. This work presents new results of experimental studies on models of a fragment of a multi-storied building made of monolithic reinforced concrete, whose nodes, connecting the girder and the column, are reinforced with laterally reinforced meshes designed to resist operational static loads and a special emergency impact caused by the failure of one ground-floor column in the framework.

Results. The article presents the results of experimental and theoretical studies on the stress-strain state and crack resistance of reinforced concrete frames or fragments of multi-storied frameworks of buildings, made of monolithic reinforced concrete. Nodes of these buildings are laterally reinforced. The data on force-induced resistance of structures were obtained for cases of the static operational loading of a structure and special emergency impacts caused by the instantaneous withdrawal of one column on the ground floor. A comparative analysis of the pace of cracking, crack development and opening is made. The co-authors have made a benchmark assessment of parameters of limit and beyond-the-limit states, as well as elements of structural systems, having nodes with/without laterally reinforced meshes.

Conclusions. The co-authors have identified the nature of actual deformation and destruction of elements in the bearing system, whose nodes are laterally reinforced. The co-authors have experimentally identified the principal properties of structural elements to allow for a more rigorous assessment of deformability and the bearing capacity of the effect produced by the lateral reinforcement on the resistance of structural systems in beyond-the-limit states.

KEYWORDS: progressive collapse, reinforced concrete structures, lateral reinforcement, additional dynamic loading, survivability, special limit state, physical nonlinearity

FOR CITATION: Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Phan Dinh Quoc. A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1462-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472

Corresponding author: Pavel A. Korenkov, kpa_gbk@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Решение вопроса защиты конструкций каркасов многоэтажных зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [1–3] может быть найдено различными средствами. В настоящее время известны предложения с использованием предварительно напряженных ригелей [4], устройства аутигерных этажей¹, увеличение сечений несущих конструкций перекрытий под первым этажом, пропорционально возрастающим внутренним усилиям [5], изменение конструктивных решений несущей системы [6]. Одним из перспективных и малозатратных способов увеличения живучести рамных, рамно-связевых и других типов железобетонных конструктивных систем зданий представляется введение в узлы сопряжения конструктивных элементов косвенного армирования [7–10], которое может быть выполнено как традиционным, так и принципиально новыми методами [11].

На сегодняшний день отсутствуют сведения о работе несущих элементов с косвенным армированием в рассматриваемых системах при статико-динамических режимах деформирования. Это определяет актуальность данной тематики.

Известно, что косвенное армирование сжатых железобетонных элементов существенно повышает их прочность и предельную деформативность, что подтверждается не только результатами исследований [12–17], но и действующими нормативными

документами². В связи с этим предположение о том, что применение косвенной арматуры в изгибаемых, внецентренно сжатых и сжатых элементах может оказать значительное влияние на изменения перераспределения силовых потоков в конструктивной системе при ее структурной перестройке, находит свое подтверждение в работах отечественных и зарубежных авторов [18–23].

Так же необходимо отметить, что простое увеличение площади сечения растянутой арматуры пропорционально увеличению внутренних усилий, вызванных динамическим догружением при рассматриваемых аварийных воздействиях, имеет ограниченные рамки и не всегда является эффективным способом защиты от прогрессирующего обрушения без обеспечения пластического характера разрушения [6]. В то же время деформативность косвенного армированного бетона, лимитированная величиной ϵ_{b2} , почти в три раза выше, чем без такого армирования, это может стать существенным резервом при разработке способов защиты конструкций от прогрессирующего обрушения (рис. 1).

Другим плюсом такого конструктивного решения служит возможность увеличения площади растянутой арматуры без необходимости увеличивать геометрические размеры сечения³. Количественный анализ изменения динамической прочности и времени динамического догружения в сечении нагруженного изгибаемого железобетонного элемента,

¹ Патент РФ № 151757, МПК E02B 1/00. Рамный каркас многоэтажного здания / П.А. Кореньков; заявитель и патентообл. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. № 2014154656/93 от 21.12.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

² СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003. М., 2018.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. ЭС НТИ «Техэксперт», 2017. 35 с.

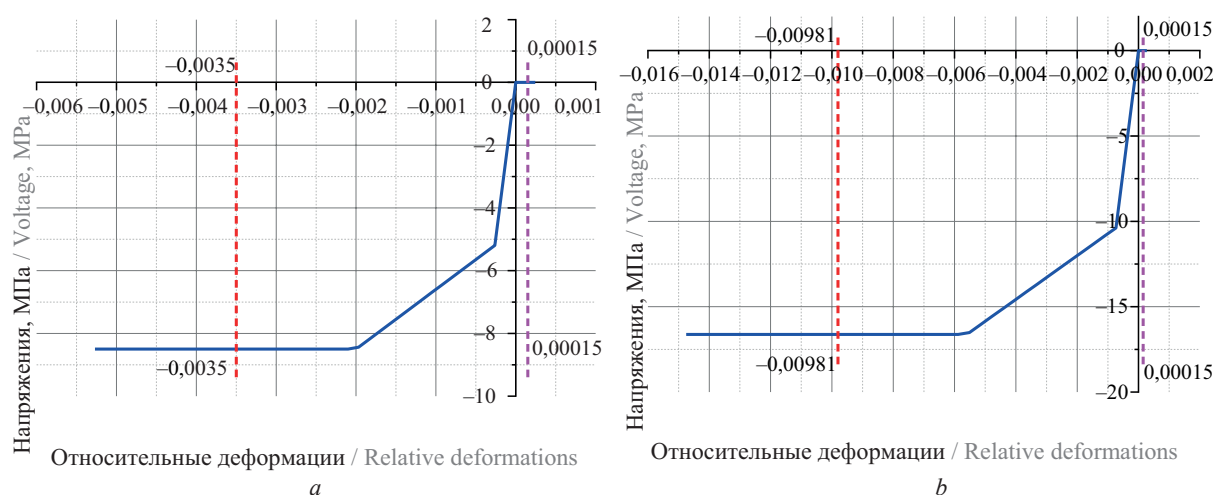


Рис. 1. Диаграммы «напряжения-деформации» бетона класса В15: *a* — обычного; *b* — усиленного сетками косвенного армирования

Fig. 1. Deformation stress diagrams made for B15 concrete: *a* is for conventional concrete; *b* is for concrete that has lateral reinforcement meshes

усиленного косвенным армированием при его динамическом догружении, для оценки эффективности такой защиты выполнен авторами в работах [16, 24].

Настоящее исследование посвящено оценке качественного и количественного характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивной системы и экспериментальной проверке критериев особого предельного состояния в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения сформулированных задач была разработана методика и проведены экспериментальные исследования конструкций железобетонных рам, моделирующих фрагмент каркаса многоэтажного здания. Испытано три серии рам: РЖ-1 — рама с внезапно выключающейся центральной стойкой без усиления косвенным армированием; РЖ-2 — такая же, но с ригелями, усиленными сетками косвенного армирования; РЖ-3 — рама с внезапно выключающейся крайней стойкой и ригелями, усиленными сетками косвенного армирования.

Рамы изготовлены из бетона класса В15. Ригели рам армированы в верхней и нижней зонах симметричной арматурой по высоте сечения в виде двух стержней диаметром 6 мм класса А240 (рис. 2, *a-d*). Участки ригелей, примыкающие к колоннам, с целью защиты от прогрессирующего обрушения дополнительно армированы сетками косвенного армирования на длину 290 мм от наружной грани колонны. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2 мм шагом 50 и 100 мм у опор и в пролете соответственно. Такое армирование назначено по результатам расчета опытных конструкций рам на заданную проектную нагрузку

в виде сосредоточенных сил P_i , приложенных попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 1/3 пролета ригеля.

Для передачи проектной нагрузки была использована механическая гравитационная рычажная установка⁴, состоящая из рычага и комплекта тяжей и распределительных балок, передающих на раму нагрузку от платформы со штучными грузами. Испытания проводились по методике [25] с измерением и фиксацией прогибов, перемещений, деформаций бетона и арматуры, фиксаций характера образования, развития и раскрытия, закрытия трещин на разных этапах нагружения. Рассматриваемыми сценариями особого воздействия выбраны удаление средней и крайней колонны первого этажа.

Для измерения перемещений элементов конструкции рамы установлены прогибомеры 6ПАО (рис. 2).

Измерение продольных деформаций сжатого и растянутого бетона, фиксация нагрузки трещинообразования производились методом электротензометрии. Углы поворота и прогибы ригелей измеряли с помощью прогибомеров П1-П4 (цена деления 0,01 мм). Для регистрации показаний тензорезисторов использовался измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1. Ширина раскрытия трещин измерялась микроскопом МПБ-2 с ценой деления 0,02 мм, а расстояние между трещинами на каждом этапе нагружения — штангенциркулем по ГОСТ 166-89. Всплеск

⁴ Патент РФ № 2642542, МПК G01N3/60. Устройство для экспериментального определения динамических догружений в рамно-стержневых конструктивных системах / Н.В. Ключева, П.А. Кореньков; заявитель и патентообл. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. № 2016130263 от 22.07.2016; опубл. 25.01.2018., Бюл. № 3.

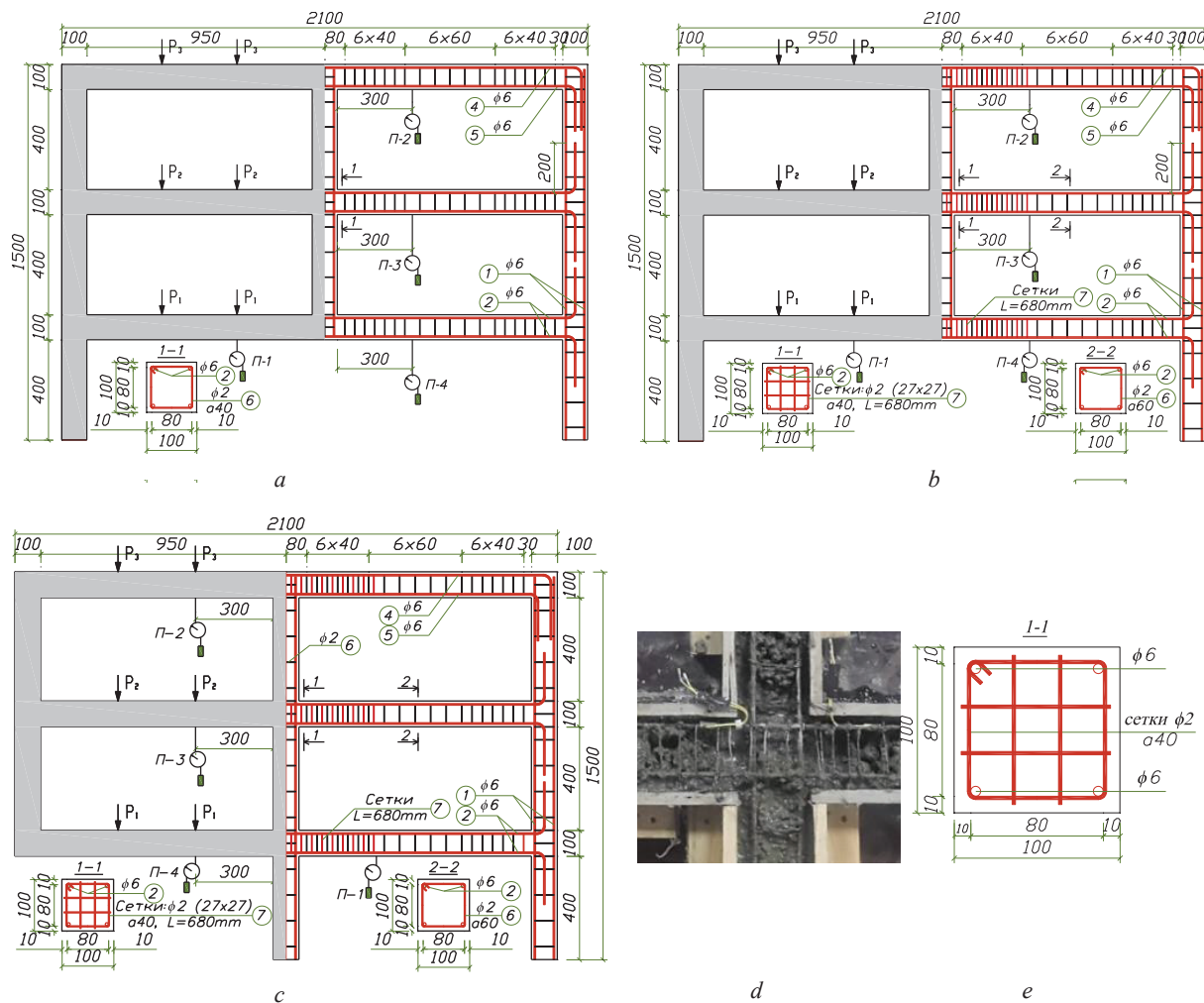


Рис. 2. Армирование и схема приложения нагрузок, расстановка измерительных приборов в раме первой (а); второй (б) и третьей (с) серий; расположение косвенного армирования в конструкции рам (д); сечение 1-1 (е)

Fig. 2. The reinforcement and loading diagram; arrangement of measuring devices in the frame of the first (a); second (b) and third (c) series; location of lateral reinforcement in the structure of frames (d); section 1-1 (e)

перемещений в пролетах рамы при приложении за-
проектного воздействия фиксировался с записью
показаний прогибомеров на цифровые видеокамеры
с частотой съемки 240 кадров в секунду [24].

Цель испытаний — определение параметров статико-динамического деформирования элементов конструктивной системы после внезапной структурной перестройки, анализ трещинообразования и проверка критериев особого предельного состояния железобетонных рам для оценки эффективности применения косвенного армирования узлов сопряжения конструктивных элементов как способа защиты от прогрессирующего обрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важным параметром изучения статико-динамического деформирования железобетонных рам, вызванного особым воздействием в виде внезапного удаления одной из колонн, является коэффициент динамического догружения в конструктивных элементах рамы. Анализ трещинообразования

в опытных конструкциях рам до приложения особого воздействия показал, что значения нагрузки трещинообразования в раме с косвенной арматурой существенно выше (см. рис. 3). Значения нагрузок на ступенях загрузения показаны в табл.

После выключения из работы средней колонны характер работы несущей системы с усилением узлов (рама РЖ-2) и без усиления (рама РЖ-1) отличался следующим. В раме РЖ-1 трещины в растянутой зоне самого нагруженного ригеля первого этажа имеют характер повреждений, аналогичный исследованиям [25, 26], а именно отрыв ригеля от колонны с образованием значительных трещин от 2 до 10 мм в зоне сопряжения ригеля и колонны, свидетельствующим о превышении несущей способности нормального сечения. Необходимо отметить и значительную длину образовавшихся трещин, которые пересекают все сечение ригеля и имеют продолжение вдоль колонны на четверть ее длины, т.е. до места изменения знака действующего изгибающего момента. Аналогичная картина

Значения нагрузки на ступенях, кН

Load values in steps, kN

Значения нагрузки на ступенях, кН Load values in steps, kN							
Номер ступени Step number	P_1	P_2	P_3	Номер ступени Step number	P_1	P_2	P_3
1	0,490	0,330	0,240	7	1,61	1,05	0,73
2	0,670	0,450	0,320	8	1,98	1,29	0,9
3	0,860	0,570	0,400	9	2,35	1,53	1,06
4	1,040	0,690	0,480	10	2,72	1,77	1,23
5*	1,230	0,810	0,570	11	3,100	2,010	1,400
6	1,420	0,930	0,650	12**	3,280	2,130	1,480

Примечание: * — этап трещинообразования; ** — этап перед удалением колонны.

Note: * is the cracking step; ** is the step before the column withdrawal.

трещинообразования наблюдалась и в ригелях 2-го и 3-го уровней, где также произошел отрыв ригеля от колонны с образованием трещин от 5 до 12 мм в ригеле второго этажа, и 3 и 3,5 мм в колонне верхнего уровня с одновременным приращением имеющихся трещин в ригеле первого уровня до 1 и 2,1 мм соответственно. На верхнем этаже наблюдалось разрушение как ригеля, так и колоны из-за большего эксцентриситета и уменьшения величины продольной силы.

Характер и схемы трещин в раме без косвенного армирования были аналогичны ранее проведенным исследованиям монолитных железобетонных рам, выполненных под руководством В.И. Колчунова [6] и Н.В. Федоровой [27]. Присутствовали как нормальные (тип 1) в верхней (а) и нижней (б) зоне, наклонные (тип 2) в ригелях, так и нормальные (тип 3) в колоннах. В отличие от рамы без косвенного армирования в раме серии РЖ-2 отсутствуют трещины 2-го и 3-го типа. Вследствие принятой схемы нагрузки на ригели рамы силами в 1/3 пролета имелась возможность дополнительно изучить работу нормальных и наклонных сечений, разграничив зону чистого изгиба с участком, на котором действует и поперечная сила постоянной величины, и изгибающий момент в эксплуатационной стадии и после запроектного воздействия. Сопоставив картины трещинообразования, можно видеть отсутствие наклонных трещин в раме с косвенным армированием, что объясняется увеличением значения поперечной силы, воспринимаемой таким сечением.

Переходя к анализу динамического догружения сечений элементов рамы после аварийного воздействия, отметим, что косвенное армирование не повышает прочность бетона на растяжение, а следовательно, и трещиностойкость бетона, но увеличение прочности бетона на сжатие ввиду создания объемного напряженного состояния и ограничения поперечных деформаций сжатого бетона увеличивают прочность на сжатие и деформативность всего косвенно армированного сечения изгибаемого элемента. Из-за повышения прочности сжатого бетона в узлах сопряжения ригелей с колоннами нормаль-

ные трещины образовывались вне зон косвенного армирования и по границе контакта армированных зон с бетоном без дополнительного усиления. Также следует указать на ширину раскрытия уже имеющихся и открытия новых трещин в пределах до 1–1,2 мм. Для сравнения, в раме без усиления узлов сетками ширина трещин после запроектного воздействия достигала 10–12 мм, т.е. имеет место почти 10-кратное снижение трещинообразования.

Оценка приращения напряжений в арматуре (рис. 3) была выполнена путем сопоставления ширины раскрытия трещин до и после аварийного воздействия. Данный прием вполне уместен ввиду известной связи между шириной раскрытия трещины и величиной действующих напряжений в трещине.

Сопоставлением опытных данных установлено, что в самых нагруженных сечениях рам происходит пятикратное снижение напряжений в арматуре в сечениях, усиленных косвенным армированием, вследствие изменения диссипативных свойств таких элементов при мгновенном динамическом догружении. Такое снижение деформативности сечения приводит к тому, что разрушение сечения будет осуществляться по «мягкому» варианту ввиду достижения арматурой своих предельных прочностных характеристик, сохраняя пластический характер деформирования в стадии III.

Картина деформированного состояния нижних ригелей рам всех серий (как самых нагруженных) после аварийного воздействия показана на рис. 4, где визуально прослеживаются сделанные ранее выводы.

Требованиями норм⁵ в качестве одного из критериев предельного состояния принят деформационный критерий, позволяющий с позиции требований особого предельного состояния оценить, насколько элементы конструктивной системы деформировались в зоне возможного локального обрушения.

⁵ Пособие по проектированию мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М., 2020.

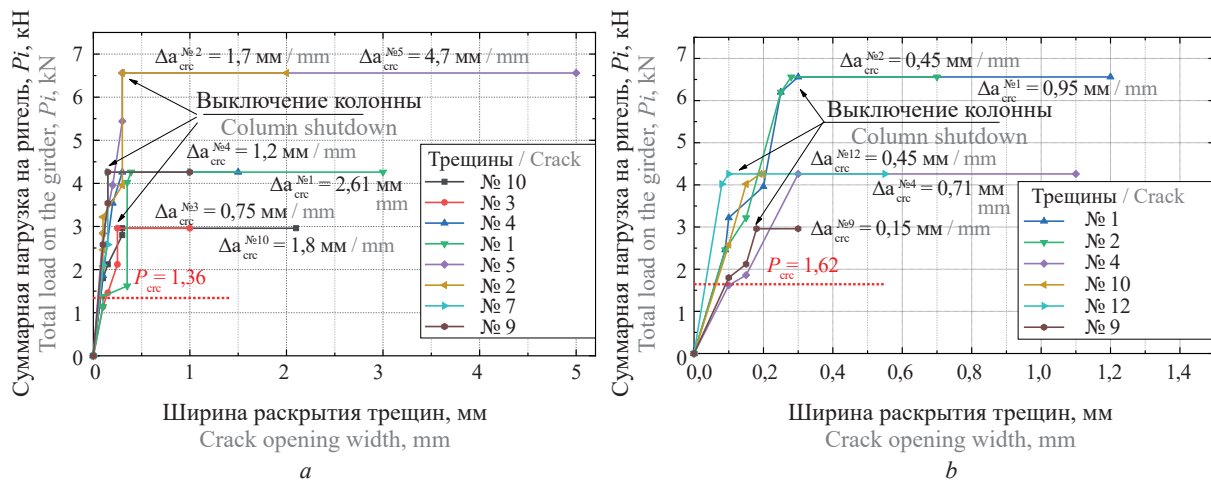


Рис. 3. Ширина раскрытия трещин при статической проектной и после запроектной нагрузке в рамах первой (a); второй (b) серий

Fig. 3. Crack opening width under the static design load and after the beyond-design load in the frames of the first (a); second (b) series

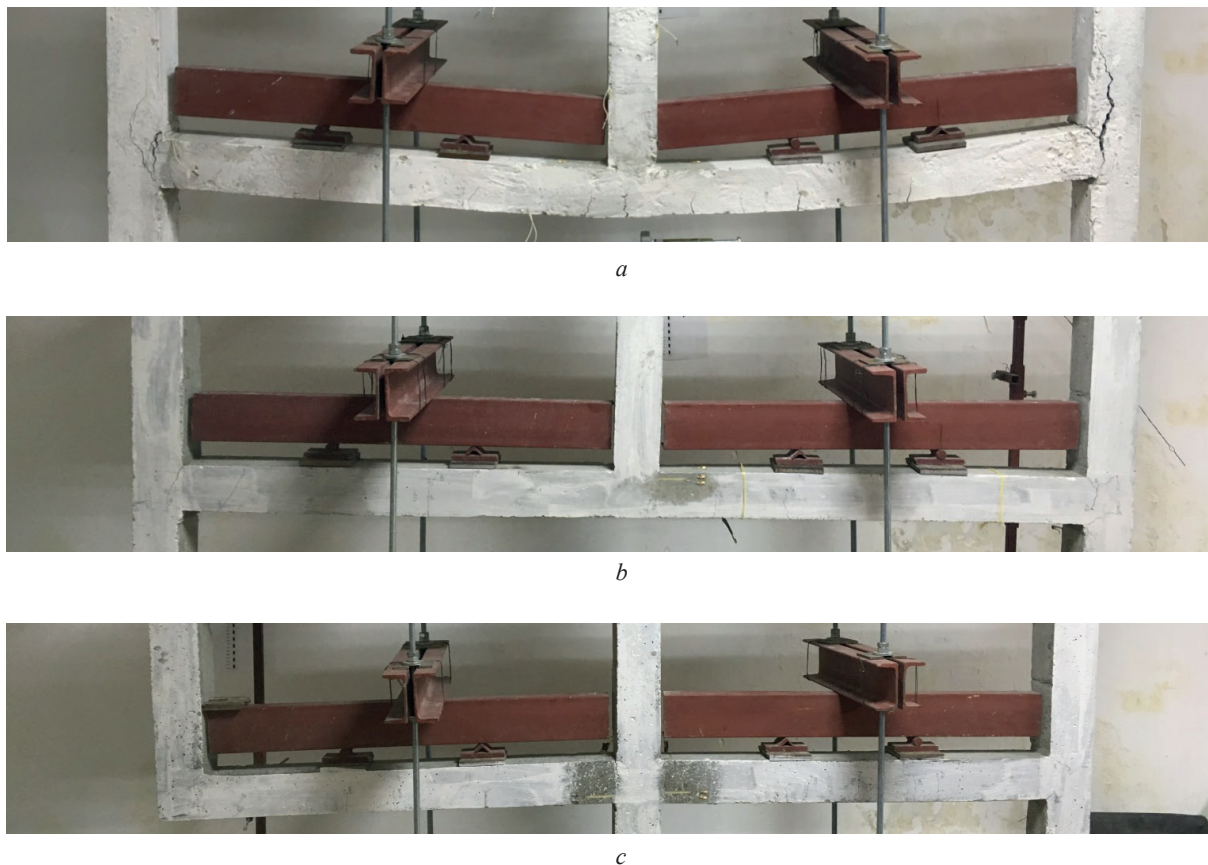


Рис. 4. Картина разрушения и деформирования нижних ригелей у рам первой (a); второй (b) и третьей (c) серий

Fig. 4. Bottom crossbars of frames of the first (a); second (b) and third (c) series: the scene of destruction and deformation

Анализируя графики зависимости прогиба от суммарной нагрузки, действующей на ригель (рис. 5), можно видеть последовательное развитие прогибов, характеризующееся сначала линейной зависимостью, а после появления и раскрытия трещин носящее явно выраженный нелинейный характер. Также можно отметить уменьшение пролетного прогиба в раме РЖ-3 на предпослед-

ней ступени нагружения, что свидетельствует о наличии перераспределения моментов в самом нагруженном ригеле первого этажа. Деформационный критерий особого предельного состояния регламентирован пособием к СП 385⁵ для конструкций, расположенных в зоне локального обрушения, равен 1/30 расчетного пролета 1000 мм и составляет 33 мм.

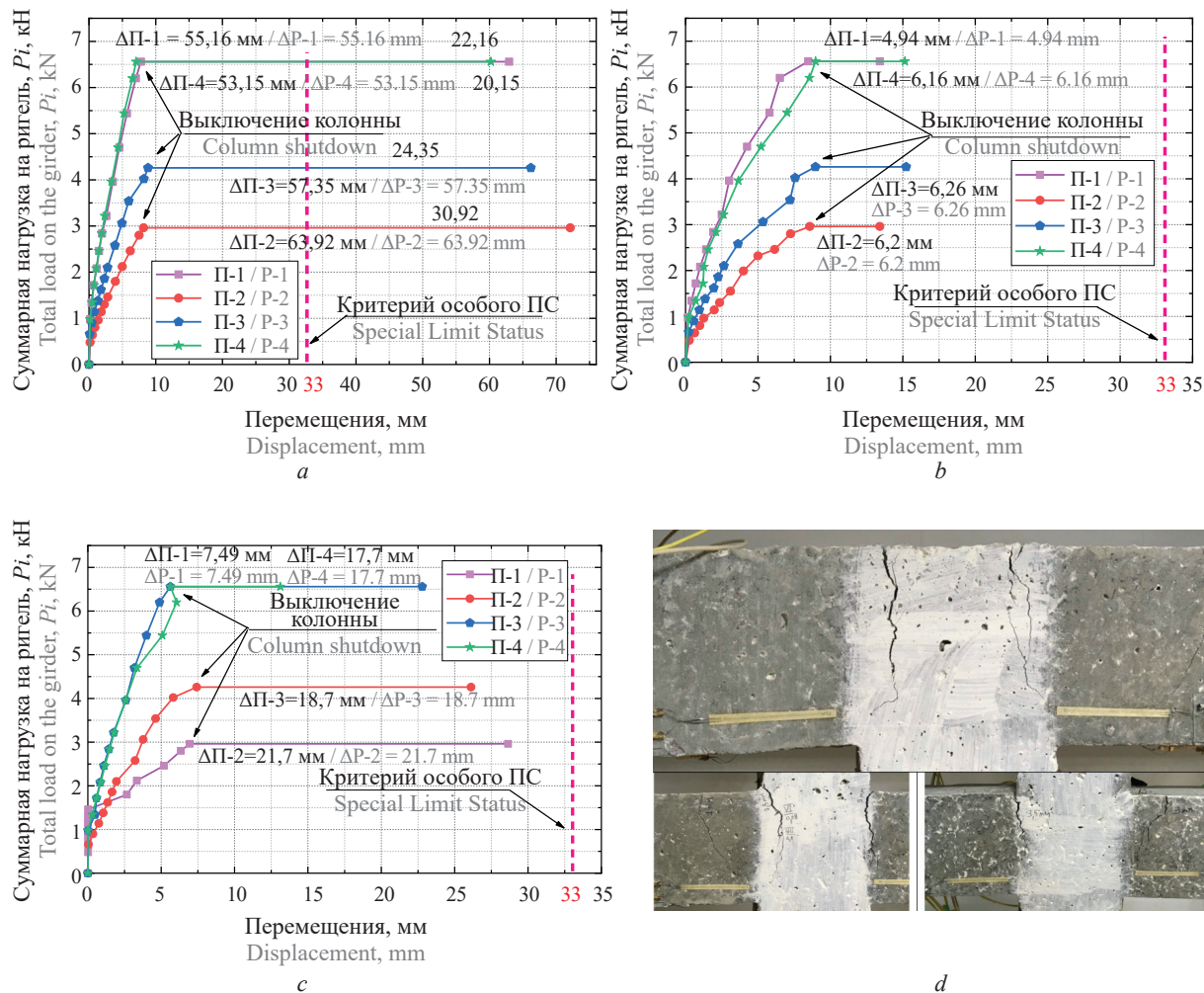


Рис. 5. Прогибы в рамах первой (а); второй (b) и третьей (c) серий при статической проектной и динамической запроектной нагрузках, характер деформирования узлов рамы третьей серии (d)

Fig. 5. Deflections in the frames of the first (a), second (b) and third (c) series under the design static load and the dynamic beyond-design load; the nature of deformation in the frame nodes of the third series (d)

Для ригелей 1-го и 2-го уровней рамы первой серии значение прогиба превысило нормируемый более чем в два раза. В раме второй серии для самого нагруженного ригеля первого этажа деформационный критерий находился в пределах для рассматриваемого.

Анализ перемещений для рамы третьей серии с учетом характерной картины деформирования ее узлов позволил сделать вывод о недостижении во всех ригелях, примыкающих к удаляемому пролету, близкого к предельному состоянию и составил 1/35, 1/40 и 1/45 для ригелей 1-го, 2-го и 3-го уровней соответственно.

В пролете, примыкающем к удаляемой колонне, прогиб составил 1/135 расчетного пролета, что соответствует требованиям для пролета 1000 мм. Также можно наблюдать незначительную (до 0,4 мм) ширину раскрытия трещин в данном пролете. Интерес представляет значительное раскрытие трещин в опорных ригелях пролета, примыкающих

к аварийному, в то время как на противоположной опоре наибольшее раскрытие трещин отмечалось в нижней зоне ригеля. В раме без косвенного армирования ширина раскрытия трещин после особого воздействия от 0,8 до 1,8 мм для рассматриваемых рам с усилением узлов не превысила нормируемую и составила от 0,08 до 0,15 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования деформирования, трещинообразования и разрушения монолитных железобетонных рам с узлами, усиленными косвенным армированием, и анализ полученных результатов позволили установить действительный характер изменения НДС такой несущей рамной системы при проектных нагрузках и запроектном динамическом воздействии, вызванном удалением из работы одной из колонн первого этажа.

Экспериментально подтверждены выдвинутые авторами гипотезы об увеличении жесткости конструктивной системы за счет усиления косвенным армированием узлов в монолитных железобетонных каркасах и дополнительных резервах пластического деформирования сечений железобетонных элементов. Показано увеличение не только предельной деформативности сечений вследствие трехкратного увеличения значения ϵ_{b2} косвенно армированного бетона, но и возможность дополнительного роста прочности сечений

железобетонных элементов за счет увеличения площади растянутой арматуры без угрозы хрупкого разрушения.

Полученные результаты дают возможность более полно оценивать работу рассмотренных несущих систем при критериальной оценке параметров особого предельного состояния.

Эти результаты могут быть использованы при разработке способов защиты железобетонных каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang Q., Zhao Y.G., Kolozvari K., Xu L. Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 215. P. 110688. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110688
2. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 211. P. 110425. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110425
3. Kiakojouri F., De B.V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061
4. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1 (93). С. 74–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84
5. Zhang L., Zhao H., Wang T., Chen Q. Dynamic increase factor for RC frame with specially shaped columns against progressive collapse // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. Issue 1. Pp. 419–433. DOI: 10.21595/jve.2016.17371
6. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М. : Изд-во АСВ, 2014. 208 с.
7. Ахрамочкина Т.И. Экспериментальные исследования силы сцепления стальной оцинкованной пластины и бетона // *Строительство: наука и образование*. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1
8. Attiyah A.N., Hussain H.M. Analytical approach to predict nonlinear parameters for dynamic analysis of structures applied to blast loads // *Kufa Journal of Engineering*. 2019. Vol. 10. Issue 3. Pp. 1–18. DOI: 10.30572/2018/kje/100301
9. Mirza S.A. Examination of strength modeling reliability of physical tests on structural concrete columns // *Advances in Civil Engineering*. 2011. Vol. 2011. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2011/428367
10. Mostoufinezhad D., Saadatmand H. A procedure for predicting the behavior of FRP confined concrete using the FE method // *Scientia Iranica*. 2010. Vol. 17. Issue 6. Pp. 471–481.
11. Vieira A.D.A., Triantafyllou S.P., Bournas D.A. Strengthening of RC frame subassemblies against progressive collapse using TRM and NSM reinforcement // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 207. P. 110002. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110002
12. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 7. С. 41–44.
13. Кришан А.Л., Сабиров Р.Р., Кришан М.А. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками // *Архитектура. Строительство. Образование*. 2014. № 1 (3). С. 215–224.
14. Baduge S.K., Mendis P., Ngo T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 177. Pp. 795–808. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.008
15. Manaenkov I., Korenkov P., Grezeva A.S., Zinoveva E. Calculation of deformations of concrete with indirect reinforcement according to limit state design // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 052033. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052033
16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032
17. Kedziora S., Anwaar M.O. Concrete-filled steel tubular (CFTS) columns subjected to eccentric compressive load // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2060. Issue 1. P. 020004. DOI: 10.1063/1.5086135
18. Feng F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment

frames under progressive collapse // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 213. P. 110612. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110612

19. Zhou Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 214. P. 110675. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110675

20. Feng D.C., Xie S.C., Xu J., Qian K. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 202. P. 109877. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109877

21. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110001. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110001

22. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. Pp. 728–741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.043

23. Qian K., Liang S.L., Xiong X.Y., Fu F., Fang Q. Quasi-static and dynamic behavior of precast concrete

frames with high performance dry connections subjected to loss of a penultimate column scenario // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 205. P. 110115. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110115

24. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037

25. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4 (78). С. 42–52.

26. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // *Строительство и реконструкция*. 2020. Т. 90. № 4. С. 73–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84

27. Федорова Н.В., Ву Нгок Туен, Яковенко И.А. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1513–1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522

Поступила в редакцию 22 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 15 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 17 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виталий Иванович Колчунов** — доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; Kolchunovvi@mgsu.ru;

Павел Анатольевич Кореньков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295007, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; SPIN-код: 4512-6499, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Фан Динь Гуок — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; d2nucevn@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhang Q., Zhao Y.G., Kolozvari K., Xu L. Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss. *Engineering Structures*. 2020; 215:110688. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110688

2. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive

collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020; 211:110425. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110425

3. Kiakoouri F., De B.V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering*

Structures. 2020; 206:110061. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2019.110061

4. Iliushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame structure systems under special impact. *Building and Reconstruction*. 2021; 1(93):74-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84 (rus.).

5. Zhang L., Zhao H., Wang T., Chen Q. Dynamic increase factor for RC frame with specially shaped columns against progressive collapse. *Journal of Vibration Engineering*. 2017; 19(1):419-433. DOI: 10.21595/jve.2016.17371

6. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. *Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts*. Moscow, Publishing house ASV, 2014; 208. (rus.).

7. Akhramochkina T.I. Experimental studies of the adhesion force between a zinc-coated steel plate and concrete. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):1-16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1 (rus.).

8. Attiyah A.N., Hussain H.M. Analytical approach to predict nonlinear parameters for dynamic analysis of structures applied to blast loads. *Kufa Journal of Engineering*. 2019; 10(3):1-18. DOI: 10.30572/2018/kje/100301

9. Mirza S.A. Examination of strength modeling reliability of physical tests on structural concrete columns. *Advances in Civil Engineering*. 2011; 2011:1-16. DOI: 10.1155/2011/428367

10. Mostoufinezhad D., Saadatmand H. A procedure for predicting the behavior of FRP confined concrete using the FE method. *Scientia Iranica*. 2010; 17(6):471-481.

11. Vieira A.D.A., Triantafyllou S.P., Bournas D.A. Strengthening of RC frame subassemblies against progressive collapse using TRM and NSM reinforcement. *Engineering Structures*. 2020; 207:110002. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110002

12. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. On calculation of concrete flexural elements with indirect reinforcement of a compressed zone. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:41-44. (rus.).

13. Krishan A.L., Sabirov R.R., Krishan M.A. Calculation of the strength of compressed reinforced concrete elements with indirect reinforcement with mesh. *Architecture. Building. Education*. 2014; 1(3):215-224. (rus.).

14. Baduge S.K., Mendis P., Ngo T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement. *Engineering Structures*. 2018; 177:795-808. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.008

15. Manaenkov I., Korenkov P., Grezeva A.S., Zinoveva E. Calculation of deformations of concrete with indirect reinforcement according to limit state design. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering. 2020; 869:052033. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052033

16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect reinforcement of reinforced concrete elements as a means of protecting a constructive system from a progressive collapse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032

17. Kedziora S., Anwaar M.O. Concrete-filled steel tubular (CFTS) columns subjected to eccentric compressive load. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 2060(1):020004. DOI: 10.1063/1.5086135

18. Feng F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2020; 213:110612. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110612

19. Zhou Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures. *Engineering Structures*. 2020; 214:110675. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110675

20. Feng D.C., Xie S.C., Xu J., Qian K. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method. *Engineering Structures*. 2020; 202:109877. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109877

21. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios. *Engineering Structures*. 2020; 209:110001. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110001

22. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2019; 180:728-741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.043

23. Qian K., Liang S.L., Xiong X.Y., Fu F., Fang Q. Quasi-static and dynamic behavior of precast concrete frames with high performance dry connections subjected to loss of a penultimate column scenario. *Engineering Structures*. 2020; 205:110115. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110115

24. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and Failure of a Monolithic Reinforced Concrete Frame under Accidental Actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037

25. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Vu N.T. Technique of experimental studies of the deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts. *Construction and Reconstruction*. 2018; 4(78):42-52. (rus.).

26. Vu Ngoc Tuyen. Investigation of the survivability of a reinforced concrete structurally nonlinear frame-bar system of the frame of a multistorey building in a dy-

namic setting. *Construction and Reconstruction*. 2020; 90(4):73-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84

27. Fedorova N.V., Vu Ngoc Tuyen, Yakovenko I.A. Strength criterion for a plane stress reinforced

concrete element under a special action. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1513-1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522 (rus.).

Received October 22, 2021.

Adopted in revised form on November 15, 2021.

Approved for publication on November 17, 2021.

B I O N O T E S: **Vitaly I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Department of Unique Buildings and Structures; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040; Russian Federation; Professor of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; Kolchunovi@mgsu.ru;

Pavel A. Korenkov — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department Building Structures; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University (CFU)**; 4 Vernadsky avenue, Simferopol, 295007, Russian Federation; SPIN-code: 4512-6499, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Phan Dinh Quoc — postgraduate of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; d2nucevn@gmail.com.

Authors' contributions: All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

Оценка качества цементных композитов, экспонированных в температурно-агрессивной среде, с применением интерполирования и корреляции

Ирина Николаевна Максимова¹, Ирина Владимировна Ерофеева²,
Виктор Васильевич Афонин², Денис Владимирович Емельянов²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(ПГУАС); г. Пенза, Россия;

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(МГУ им. Н.П. Огарева); г. Саранск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы оценки качества цементных композитов на примере результатов их экспонирования в атмосферной среде с перепадами положительных и отрицательных температур. Дается числовая оценка качества цементных композитов на основе ранговой корреляции Спирмена, коэффициента детерминации и поправочных коэффициентов.

Материалы и методы. В качестве тестовых цементных композитов использовались составы под номерами от 1 до 8, которые отличаются концентрацией различных добавок, включая гиперпластификаторы и наполнители. Экспонирование тестовых составов осуществлялось в условиях циклического изменения положительных и отрицательных температур с контролем четырех свойств в контрольных точках времени: 0; 15 и 45 сут. Расширение массивов данных производится на основе линейной интерполяции. Изменения свойств композитов предлагается сопоставлять с контрольными значениями с вычислением ранговой корреляции Спирмена и коэффициента детерминации. Кроме этого, массивы интерполированных значений приводятся к относительным единицам для вычисления поправочных коэффициентов. С помощью вводимых величин формируется метрика оценки качества цементных композитов.

Результаты. На основе предложенной числовой метрики осуществляется ранжирование тестовых образцов для определения предпочтительных составов. Все выполняемые действия реализуются с помощью библиотечных функций и программных преобразований системы MATLAB, которые, в свою очередь, могут быть реализованы практически на любом языке программирования.

Выводы. Предложенная эвристическая оценка качества цементных композитов может быть распространена на случаи, когда экспонирование тестовых образцов производится в других агрессивных и неблагоприятных эксплуатационных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка качества цементных композитов, положительные и отрицательные температуры, интерполяция, тестовые образцы, ранговая корреляция Спирмена

Благодарности. Авторы выражают благодарность академику РААСН В.Т. Ерофееву за постановку задачи исследования цементных композитов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Афонин В.В., Емельянов Д.В. Оценка качества цементных композитов, экспонированных в температурно-агрессивной среде, с применением интерполирования и корреляции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1473–1482. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1473-1482

Автор, ответственный за переписку: Денис Владимирович Емельянов, emelyanovd@yandex.ru.

Using interpolation and correlation to evaluate the quality of cement composites exposed to a thermally aggressive environment

Irina N. Maksimova¹, Irina V. Erofeeva², Victor V. Afonin², Denis V. Emelyanov²

¹ Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS); Penza, Russian Federation;

² Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the quality evaluation of cement composites after their exposure to the atmospheric environment that features a rapid change in positive and negative temperatures. The article has a numerical assessment of the quality of cement composites. The quality assessment method encompasses the Spearman's rank correlation, the coefficient of determination, and the adjustment ratio.

Materials and methods. Testable cement composites are the compositions numbered from one to eight. They differ in the concentration of various additives, including superplasticizers and aggregates. Testable compositions were exposed to

cyclic changes in positive and negative temperatures, and four of their properties were checked in the points of control on Day 0, Day 15, and Day 45. Linear interpolation was used to expand the data array. Changes in the properties of composites were compared with the benchmark values; the Spearman's rank correlation and the coefficient of determination were calculated. Moreover, arrays of interpolated values were reduced to relative units to calculate the adjustment ratios. Entry values were employed to develop the evaluation metrics and assess the quality of cement composites.

Results. The proposed numerical metrics is used to rank the testable samples and identify the best compositions. Library functions and transformations, available in the MATLAB system, are applied to each action, which can be implemented in nearly any software programming language.

Conclusions. The proposed method of heuristic quality evaluation of cement composites may be applied to the cases when testable samples are exposed to versatile adverse and aggressive operating conditions.

KEYWORDS: cement composite quality assessment, positive and negative temperatures, interpolation, testable samples, Spearman's rank correlation

Acknowledgments. The co-authors would like to express gratitude to V.T. Erofeev, Academician, RAACS, for setting the task of studying the cement composites.

FOR CITATION: Maksimova I.N., Erofeeva I.V., Afonin V.V., Emelyanov D.V. Using interpolation and correlation to evaluate the quality of cement composites exposed to a thermally aggressive environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1473-1482. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1473-1482

Corresponding author: Denis V. Emelyanov, emelyanovd@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Цементные композиты имеют разнообразные составы, изучению которых посвящено значительное число научных и исследовательских работ [1–10]. Контрольные испытания композитов осуществляются в различных эксплуатационных средах, включая модельные условия [11–21]. Это — оценка качества материалов и анализ результатов при экспонировании строительных материалов в специальных агрессивных средах [11, 12, 13–23] и по отсканированным изображениям [13, 24]. Одной из задач изучения цементных композитов является создание оптимальных составов, которые обеспечивают выполнение некоторых заранее заданных эксплуатационных требований [22–27]. Другой актуальный вопрос — оптимальный выбор состава образца из группы цементных композитов, прошедших определенные модельные эксплуатационные испытания. Здесь имеются определенные решения [28, 29]. В предлагаемой работе учитываются четыре свойства: твердость (T_{15}), модуль деформации материала E_d , равновесный модуль упругости $E_{ув}$, условно-мгновенный модуль упругости E_o . Значения этих свойств контролировались во время испытаний при циклическом воздействии положительных и отрицательных температур. На основе полученных экспериментальных данных осуществляется их статистическая обработка, включающая интерполирование [30–33] с шагом 5 сут от 0 до 45 сут, вычисление коэффициентов ранговой корреляции Спирмена [34, 35] и детерминации [35, 36]. Эти коэффициенты являются безразмерными, поэтому их целесообразно использовать при анализе данных различной величины и размерности. Комбинация статистических коэффициентов далее будет раскрыта полнее. С их помощью, а также специальных поправок авторами предлагается числовая оценка качества рассматриваемых строительных материалов. Эту оценку принято называть метрикой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве тестовых образцов использовались составы цементных композитов:

- состав № 1 — цементный камень на основе теста нормальной густоты;
- состав № 2 — цементный камень с высоким водоцементным отношением;
- состав № 3 — цементный камень на основе теста нормальной густоты с добавкой гиперпластификатора типа Melflux с оптимальным содержанием песчаного наполнителя фракций 0–0,63 и 0,63–2,5 мм.
- состав № 5 — порошково-активированный бетон с микрокремнеземом, каменной мукой и гиперпластификатором типа Melflux;
- состав № 4 — порошково-активированный бетон с каменной мукой и гиперпластификатором типа «Melflux»;
- состав № 6 — песчаный бетон переходного поколения с гиперпластификатором типа Melflux, наполненный песком фракций 0–0,63 и 0,63–2,5 мм;
- состав № 7 — песчаный бетон с гиперпластификатором типа Melflux;
- состав № 8 — порошково-активированный бетон нового поколения с гиперпластификатором типа «Хидетал 9γ».

Все перечисленные составы изготовлены на ульяновском цементе типа ПЦ500Д0.

Термоциклические испытания образцов («арктика») в климатической камере проведены в два этапа [16]. На первом этапе партия образцов испытана пятнадцатью термоциклами, на следующем этапе — тридцатью термоциклами. Один термоцикл включает четыре термосостояния:

1. Охлаждение тестовых образцов от комнатной температуры (+23 °C) до –50 °C около часа (50–55 мин).
2. Экспонирование образцов при температуре –50 °C 9 ч.
3. При выключенной камере естественное нагревание образцов до комнатной температуры (+23 °C) — не менее 5 ч.

Табл. 1. Экспериментальные данные

Table 1. Experimental data

Состав Composition	Длительность выдерживания, сут Retention time, days	Показатели свойств, МПа Property indicators, MPa			
		T15 / T15	$E_d 15 / E_d 15$	$E_{ув} / E_{ув}$	E_o / E_o
№ 1	0	4010,17	92 914,38	144 975,95	148 001,57
	15	2037,07	33 544,78	38 384,05	38 608,57
	45	1349,36	18 225,47	36 664,94	39 646,37
№ 2	0	2065,24	34 205,20	61 323,24	62 793,01
	15	1274,53	16 660,73	19 507,92	19 644,69
	45	1964,85	31 738,10	52 799,55	54 043,34
№ 3	0	7016,08	214 592,64	285 239,47	289 017,40
	15	3629,11	79 711,48	97 264,28	99 291,49
	45	2166,32	36 742,32	71 976,34	75 933,95
№ 4	0	5476,90	147 693,86	183 037,86	186 522,72
	15	3966,10	91 025,36	103 947,96	104 959,54
	45	3194,28	66 153,45	70 480,34	70 538,05
№ 5	0	9746,86	354 170,95	417 368,27	418 783,80
	15	3786,73	85 008,56	91 850,16	91 882,02
	45	2488,71	45 393,31	66 619,05	68 211,63
№ 6	0	4089,57	95 300,69	111 239,79	112 973,23
	15	1893,79	30 039,44	32 503,00	32 596,32
	45	8332,25	279 575,54	314 550,10	323 775,03
№ 7	0	1187,85	14 949,93	32 376,75	33 658,51
	15	3082,22	62 748,48	85 358,93	87 995,94
	45	1654,55	25 102,66	30 104,94	30 195,60
№ 8	0	7488,59	250 219,85	286 890,30	291 256,44
	15	1228,19	15 722,21	17 726,83	17 838,61
	45	2811,52	54 330,94	85 303,85	88 697,22

4. Экспонирование образцов при комнатной температуре (+23 °C) — 9 ч.

В общей сложности один термоцикл испытаний занимает около суток. Контроль показателей свойств: твердости (T15), модуля деформации материала $E_d 15$, равновесного модуля упругости $E_{ув}$, условно-мгновенного модуля упругости E_o , которые измеряются в МПа, осуществлялся в следующих точках времени: 0; 15; 45 сут. Результаты экспонирования приведены в табл. 1.

Для расширения данных (узловых точек), приведенных в табл. 1, было принято решение интерполировать их на основе алгоритма линейной интерполяции от 0 до 45 с шагом 5 сут. Это позволит, во-первых, в некоторой степени удовлетворить требования математической статистики о величине исследуемой выборки; а во-вторых, линейная интерполяция даст возможность избежать непред-

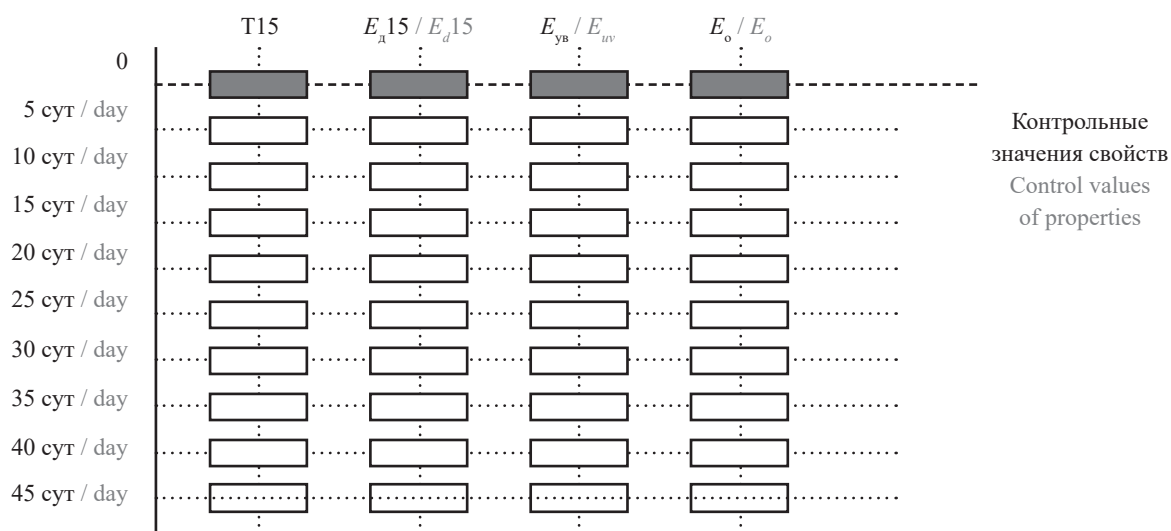
сказуемого поведения в крайних узловых точках экспериментальных данных. Погрешности интерполирования здесь не затрагиваются [33].

Пример интерполирования для состава № 1 приведен в табл. 2.

Структура табл. 2 распространяется на все исследуемые составы со своими данными.

Информацию табл. 2 можно представить в виде матрицы для дальнейшего анализа и преобразований. Первая строка табл. 2, как первая строка двумерного массива, является базовой для применения ранговой корреляции Спирмена и вычисления коэффициента детерминации R^2 с целью сравнения всех строк матрицы со значениями первой строки. Пример матрицы с выделенной первой строкой показан на рис.

Модельная матрица условно отображает значения данных, приведенных в табл. 2. Каждая стро-



Модельная матрица интерполированных данных

Model matrix of interpolated data

ка матрицы сопоставляется со значениями первой строки, которая на рис. затемнена.

Первый шаг в получении числовой метрики оценки качества исследуемых цементных композитов заключается в расчете коэффициентов ранговой корреляции Спирмена [34–36]. Для этого девять строк каждой модельной матрицы сравниваем с первой строкой, значения которой получены в контрольной (нулевой) точке испытаний. Формируем массив результатов, имя которого назовем как Sp (от Spearman). Далее вычислим среднее арифметическое значение и умножим его на минимальное значение, в результате чего получим значение, например, с именем Sm :

$$Sm = \text{mean}(Sp) \min(Sp), \quad (1)$$

где mean , $\min$ — функции, определяющие среднее арифметическое и минимальное значение одномерного массива Sp .

Следующий шаг аналогичен предыдущему с той разницей, что вычисляются коэффициенты детерминации, например, с именем $R2$. Отметим, что коэффициент детерминации изменяется от -1 до $+1$ [35, 36]. В проводимых расчетах сделано приведение к диапазону $[0; 1]$ с помощью очевидного преобразования:

$$R2 = (R2 + 1)/2. \quad (2)$$

Для совокупности значений $R2$ в последующем применяется максимальное значение.

Расчетные действия (1), (2) выполняются для интерполированных данных каждого из тестовых составов цементных композитов.

Следующий заключительный этап начинается с приведением к относительным значениям интерполированных массивов каждого из составов. Пример такого приведения к относительным единицам показан в табл. 3 для состава № 1.

Табл. 2. Пример интерполирования данных состава № 1

Table 2. Sample interpolation of Composition 1 data

Длительность экспонирования, сут Exposure time, days	Показатели свойств, МПа Property indicators, MPa			
	T15	E_{d15} / E_{d15}	E_{ub} / E_{ub}	E_o / E_o
0	4010,17	92 914,38	144 975,95	148 001,57
5	3352,47	73 124,51	109 445,32	111 537,24
10	2694,77	53 334,65	73 914,68	75 072,90
15	2037,07	33 544,78	38 384,05	38 608,57
20	1922,45	30 991,56	38 097,53	38 781,54
25	1807,83	28 438,34	37 811,01	38 954,50
30	1693,21	25 885,13	37 524,50	39 127,47
35	1578,60	23 331,91	37 237,98	39 300,44
40	1463,98	20 778,69	36 951,46	39 473,40
45	1349,36	18 225,47	36 664,94	39 646,37

Табл. 3. Пример приведения данных для состава № 1

Table 3. Sample data reduction for Composition 1

Длительность экспонирования, сут Duration of exposure, day	Показатели свойств, отн. ед. Property indicators, rel. units			
	T15	$E_{д15} / E_{д15}$	$E_{уб} / E_{ув}$	E_o / E_o
0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
5	0,835992	0,787010	0,754921	0,753622
10	0,671984	0,574019	0,509841	0,507244
15	0,507976	0,361029	0,262785	0,260866
20	0,479394	0,333550	0,262785	0,262035
25	0,450812	0,306070	0,260809	0,263203
30	0,422230	0,278591	0,258833	0,264372
35	0,393648	0,251112	0,256856	0,265541
40	0,365066	0,223633	0,254880	0,266709
45	0,336484	0,196153	0,252904	0,267878

В соответствии с табл. 3 определяется ее максимальный элемент без значений первой строки, если максимальный элемент меньше числа 1. Иначе выполняется поиск максимального элемента всего массива. В результате повторений для каждого состава получим одномерный массив, состоящий из максимальных элементов приведенных массивов. Если одномерный массив с максимальными элементами приведенных массивов определен через *Rel*, то далее определяются поправочные коэффициенты *Coef* для каждого из составов в виде обратных значений *Rel*:

$$Coef = 1/Rel. \quad (3)$$

С учетом выражений (1)–(3) на заключительном этапе расчет искомой метрики качества *Metric* выполняется по следующей формуле:

$$Metric = Coef \times Sm + R2. \quad (4)$$

Следует признать, что формулы (1), (3), (4) являются в определенной мере эвристическими, поэтому авторы готовы принять замечания и соображения по этому поводу.

В заключение раздела отметим, что коэффициент корреляции рангов Спирмена используется для оценки качества связи между двумя совокупностями числовых данных. Этот метод ранговой корреляции относится к непараметрическому статистическому методу, предназначенному для установления существования связи изучаемых явлений. В целом непараметрические методы — это количественные методы статистической обработки данных, применение которых не требует знания закона распределения изучаемых признаков в совокупности и вычисления их основных параметров, т.е. их применяют при большей неопределенности по априорной информации [34–36]. В отличие, например, от метода Пирсона, который ориентируется на нормальное распределение данных исследуемой совокупности.

Отметим также, что коэффициент детерминации R^2 есть доля дисперсии зависимой пере-

менной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости. Он выступает универсальной мерой зависимости одной случайной величины от множества других [35, 36]. В случае тесной связи между переменными значение коэффициента стремится к единице. В противном случае коэффициент детерминации с учетом выражения (2) будет стремиться к нулю.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В целях экономии места здесь не показана вся таблица приведенных значений интерполированных данных. Пример табл. 3 позволяет восстановить значения для всех составов исследованных цементных композитов с первичными экспериментальными данными, представленными в табл. 1.

В соответствии с описанной методикой получения метрики приведем конечные результаты в табл. 4, в которой составы ранжированы по величине метрики оценки качества исследованных цементных композитов.

В соответствии с данными табл. 4 заключаем, что метрика качества самая высокая у состава № 8. Он более предпочтительный по сравнению с остальными, принимая во внимание контролируе-

Табл. 4. Результаты ранжирования составов цементного композита

Table 4. The ranking of the cement composite compositions

Номер состава Composition No.	Метрика Metrics
8	2,421319
5	2,274648
3	2,229956
1	2,228288
4	2,111820
2	2,103418
6	1,343700
7	1,324062

мые свойства T_{15} , $E_d 15$, $E_{ув}$, E_o . Именно по ним выполнены расчеты по метрике качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенной методики оценки качества цементных композитов позволяет до-

статочно оперативно производить ранжирование группы образцов со схожими свойствами. В порядке продолжения исследований можно выполнить оценку качества цементных композитов с последовательным применением ранговой корреляции Пирсона и Кендалла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калашиников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 10–11 (694–695). С. 120.
2. Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Максимова И.Н. О конструкционных свойствах матричной фазы высокопрочных цементных композитов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 4–10. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.04-10
3. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V. et al. A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 21. P. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712
4. Рузиев Х.Р. Разработка и теоретическое исследование рациональных видов легких бетонов для наружных стен в условиях жаркого климата // Современное состояние и перспективы развития строительной механики на основе компьютерных технологий и моделирования: мат. Междунар. науч.-техн. конф., Самарканд, 16–17 июня 2017. 2017. С. 254–255.
5. Денисюк И.Ю., Успенская М.В., Фокина М.И., Логушкова К.Ю. Электропроводящая композиция бетона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 158–162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162
6. Соловьев В.Г., Шувалова Е.А., Шаламов В.В. Влияние минерального волокна на стойкость тяжелого бетона к статическим и циклическим нагрузкам // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 1 (733). С. 78–86. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-733-1-78-86
7. Erofeev V., Smirnov V., Dergunova A., Bogatov A., Letkina N. Development and research of methods to improve the biosustainability of building materials // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 305–311. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.305
8. Максимова И.Н. Влияние химической добавки и пониженной начальной температуры структурообразования и твердения на параметры конструкционной прочности цементных композитов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 442–449. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.442-449
9. Рахманов В.А., Сафонов А.А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 120–125.
10. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 2. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2
11. Del Coz Díaz J.J., Rabanal F.P.Á., Nieto P.J.G., Hernández J.D., Soria B.R., Pérez-Bella J.M. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 543–555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.045
12. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Казначеев С.В., Смирнов В.Ф. Влияние эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 23–31.
13. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н., Старцев О.В. и др. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов Черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11–5. С. 911–924.
14. Добышиц Л.М. Физико-математическая модель разрушения бетона при переменном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. № 12. С. 30–36.
15. Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 64–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66
16. Ерофеева И.В., Федорцов В.А., Афонин В.В., Емельянов Д.В., Подживотов Н.Ю., Мусеев В.В. и др. Исследования влияния циклически действующих отрицательных и положительных температур на демпфирующие свойства цементных композитов // Chemical Bulletin. 2018. Т. 1. № 3. С. 42–51.
17. Kazuo W., Rodgers B.M., Takashi H. The effect of testing conditions (hot and residual) on fracture toughness of fiber reinforced high-strength concrete subjected to high temperatures // Cement and Concrete Research. 2013. Vol. 51. Pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.04.003

18. Загоруйко Т.В. Структурные изменения композиционных материалов в условиях термических воздействий // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 10. С. 8–10.
19. Братошевская В.В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Исследование напряженного состояния в цементном камне и бетоне при отрицательных температурах // *Потенциал современной науки*. 2016. № 5 (22). С. 5–8.
20. Elchishcheva T., Erofeev V. The influence of salts' presence in the materials on their moisture and thermal conductivity // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1011. Pp. 179–187. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1011.179
21. Афонин В.В., Ерофеева И.В., Федорцов В.А., Емельянов Д.В., Подживотов Н.Ю. Эвристический подход к решению двухкритериальной задачи оптимизации композиционных материалов // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 11. С. 1357–1366. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1357-1366
22. Тарасов В.Н., Гусев Б.В., Петрунин С.Ю., Короткова Н.П., Гариовесов А.П. Оценка эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2018. Т. 4. № 1. С. 29–40.
23. Семейных Н.С., Сопегин Г.В., Федосеев А.В. Оценка физико-механических свойств пористых заполнителей для легких бетонов // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 2 (113). С. 203–212. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.203-212
24. Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Ельчищева Т.Ф., Зоткина М.М., Ерофеева И.В. Оценка солеобразования на цементных композитах по отсканированным изображениям // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1523–1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1523-1533
25. Сафронов В.Н., Кугаевская С.А. Оптимизация свойств цементных композитов при различных технологических приемах подготовки цикловой магнитной активации воды затворения // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 1 (42). С. 85–99.
26. Димитриенко Ю.И., Дрогойлов А.Н., Губарева Е.А. Оптимизация многокомпонентных дисперсно-армированных композитов на основе сплайн-аппроксимации // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015. № 2. С. 216–233. DOI: 10.7463/0215.0757079
27. Меркулов Д.А., Коротаев С.А., Ерофеев В.Т. Оптимизация гранулометрического состава кварцenaполненных полиэфирных композитов // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2017. № 5(993). С. 31–33.
28. Попов О.А., Лапина О.И. Выбор оптимальных составов дисперсно-армированных композитов с применением экспериментально-статистического моделирования // *Строительные материалы и изделия*. 2002. С. 1–4.
29. Yang S.Y., Girivasan V., Singh N.R., Tan-sel I.N., Kropas-Hughes C.V. Selection of optimal material and operating conditions in composite manufacturing. Part II: complexity, representation of characteristics and decision making // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43. Issue 2. Pp. 175–184. DOI: 10.1016/s0890-6955(02)00133-5
30. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1994. Pp. 52–62.
31. Akima H. Algorithm 760: Rectangular-grid-data surface fitting that has the accuracy of a bicubic polynomial // *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1996. Vol. 22. Issue 3. Pp. 357–361. DOI: 10.1145/232826.232854
32. Di Piazza A., Lo Conti F., Noto L.V., Viola F., La Loggia G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011. Vol. 13. Issue 3. Pp. 396–408. DOI: 10.1016/j.jag.2011.01.005
33. Chen L., Gao F., Zhao B., Ma L. Calculation of space NURBS curve interpolation error // *Journal of Computer and Communications*. 2020. Vol. 08. Issue 06. Pp. 1–9. DOI: 10.4236/jcc.2020.86001
34. Gibbons J.D., Chakraborti S. Nonparametric statistical inference. 5th Edition, CRC Press, Boca Raton. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-04898-2_420
35. Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // *Системные технологии*. 2011. № 2 (73). С. 9–14.
36. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Поступила в редакцию 20 августа 2021 г.

Принята в доработанном виде 15 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 15 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Николаевна Максимова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и технологии строительного производства; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 374980, Scopus: 57192644514, ResearcherID: W-2466-2017, ORCID: 0000-0001-7075-1684; maksimovain@mail.ru;

Ирина Владимировна Ерофеева — кандидат технических наук, старший доцент кафедры геодезии, картографии и геоинформатики; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 5569-3057, Scopus: 57191250834, ORCID: 0000-0003-1506-8502; ira.erofeeva.90@mail.ru;

Виктор Васильевич Афонин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 101166, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Денис Владимирович Емельянов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 624423, Scopus: 56296810000, ResearcherID: U-5081-2019, ORCID: 0000-0001-8087-3378; emelyanoffdv@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concretes of a new generation. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016; 10-11(694-695):120. (rus.).
2. Erofeev V.T., Makridin N.I., Maksimova I.N. On structural properties of the matrix phase of high-strength cement composites. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 3:4-10. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.04-10 (rus.).
3. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V. et al. A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete. *Materials*. 2020; 13(21):4712. DOI: 10.3390/ma13214712
4. Ruziev H.R. Development and theoretical study of rational types of lightweight concrete for external walls in hot climates. *Current state and prospects of development of construction mechanics on the basis of computer technologies and modeling. Materials of the international scientific and technical conference*. Samarkand, 2017; 16–17 Jun. 2017; 254-255. (rus.).
5. Denisjuk I.Yu., Uspenskaya M.V., Fokina M.I., Logushkova K.Yu. Conductive concrete composition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018; 18(1):158-162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162 (rus.).
6. Solov'ev V.G., Shuvalova E.A., Shalamov V.V. Mineral fiber influence on the heavy concrete resistance to static and cyclic loads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 1(733):78-86. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-733-1-78-86 (rus.).
7. Erofeev V., Smirnov V., Dergunova A., Bogatov A., Letkina N. Development and research of methods to improve the biostability of building materials. *Materials Science Forum*. 2019; 974:305-311. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.305
8. Maksimova I.N. Influence of chemical additive and reduced initial temperature of structure formation and hardening on parameters of structural strength of cement composites. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14:4:442-449. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.442-449 (rus.).
9. Rakhmanov V.A., Safonov A.A. Development of experimental evaluation methods for stress-strain diagrams of concrete under compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 3:120-125. (rus.).
10. Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Aleksandrova O.V. Geopolymer concrete made using large-tonnage technogenic waste. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2 (rus.).
11. Del Coz Díaz J.J., Rabanal F.P.Á., Nieto P.J.G., Hernández J.D., Soria B.R., Pérez-Bella J.M. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. *Construction and Building Materials*. 2013; 40:543-555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.045
12. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Kaznacheev S.V., Smirnov V.F. Influence of the operational environment on the biostability of building composites. *Engineering and Construction Journal*. 2012; 7(33):23-31. (rus.).
13. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N., Startsev O.V. et al. The study of stability of polymeric coatings in terms of exposing climatic factors of the black sea coast. *Fundamental Research*. 2016; 11-5:911-923. (rus.).
14. Dobshits L.M. Physical-mathematical model of concretes destruction at alternate freezing and thawing. *Housing Construction*. 2017; 12:30-36. (rus.).
15. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O.A., Balakireva V.V. Operation and destruction of concrete

at high and low temperatures. *Construction Materials*. 2019; 3:64-66. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66 (rus.).

16. Erofeeva I.V., Fedortsov V.A., Afonin V.V., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu., Moiseev V.V. et al. Studies of the influence of cyclically acting negative and positive temperatures on the damping properties of cement composites. *Chemical Bulletin*. 2018; 1(3):42-51. (rus.).

17. Kazuo W., Rodgers B.M., Takashi H. The effect of testing conditions (hot and residual) on fracture toughness of fiber reinforced high-strength concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2013; 51:6-13. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.04.003

18. Zagoruiko T.V. The structural changes of the composition materials in the thermal influence conditions. *Fire and Explosion Safety*. 2011; 10:8-10. (rus.).

19. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. Investigation of the stress state in the cement stone and concrete at low temperatures. *Potential of Modern Science*. 2016; 5(22):5-8. (rus.).

20. Elchishcheva T., Erofeev V. The influence of salts' presence in the materials on their moisture and thermal conductivity. *Materials Science Forum*. 2020; 1011:179-187. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1011.179

21. Afonin V.V., Erofeeva I.V., Fedortsov V.A., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu. Heuristic approach to solving two-criterion problem of optimization of composite materials. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(11):1357-1366. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1357-1366 (rus.).

22. Tarasov V.N., Gusev B.V., Petrunin S.Yu., Korotkova N.P., Garnovosov A.P. Performance assessment of polycarboxylate superplasticizers for concrete manufacturing. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*. 2018; 4(1):29-40. (rus.).

23. Semey N.S., Sopenin G.V., Fedoseev A.V. Evaluation of physical and mechanical properties of porous aggregates for light concretes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(2):(113):203-212. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.203-212 (rus.).

24. Erofeev V.T., Afonin V.V., Elchishcheva T.F., Zotkina M.M., Erofeeva I.V. Using scanned images to estimate salt formation on the surface of cement composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1523-1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1523-1533 (rus.).

25. Safronov V.N., Kugaevskaya S.A. Optimization of properties of cement composites at different

magnetic activation techniques of mixing water. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014; 1(42):85-99. (rus.).

26. Dimitrienko Yu.I., Drogolyub A.N., Gubareva E.A. Optimization of multicomponent dispersed reinforced composites based on spline approximation. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2015; 2:216-233. DOI: 10.7463/0215.0757079 (rus.).

27. Merkulov D.A., Korotayev S.A., Erofeev V.T. Optimization of the granulometric composition of quarten-filled polyester composites. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2017; 5(993):31-33. (rus.).

28. Popov O.A., Lapina O.I. The choice of optimal compositions of dispersed-reinforced composites using experimental and statistical modeling. *Building Materials and Products*. 2002; 1-4. (rus.).

29. Yang S.Y., Girivasan V., Singh N.R., Tansel I.N., Kropas-Hughes C.V. Selection of optimal material and operating conditions in composite manufacturing. Part II: complexity, representation of characteristics and decision making. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003; 43(2):175-184. DOI: 10.1016/s0890-6955(02)00133-5

30. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1994; 52-62.

31. Akima H. Algorithm 760: Rectangular-grid-data surface fitting that has the accuracy of abicubic polynomial. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1996; 22(3):357-361. DOI: 10.1145/232826.232854

32. Di Piazza A., Lo Conti F., Noto L.V., Viola F., La Loggia G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011; 13(3):396-408. DOI: 10.1016/j.jag.2011.01.005

33. Chen L., Gao F., Zhao B., Ma L. Calculation of space NURBS curve interpolation error. *Journal of Computer and Communications*. 2020; 08(06):1-9. DOI: 10.4236/jcc.2020.86001

34. Gibbons J.D., Chakraborti S. *Nonparametric Statistical Inference*. 5th Edition, CRC Press, Boca Raton. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-04898-2_420

35. Bakhrushin V.E. Methods for estimating the characteristics of nonlinear statistical relationships. *System Technologies*. 2011; 2(73):9-14. (rus.).

36. Kobzar A.I. *Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006; 816. (rus.).

Received August 20, 2021.

Adopted in revised form on November 15, 2021.

Approved for publication on November 15, 2021.

B I O N O T E S: **Irina N. Maksimova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production; **Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS)**; 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation; ID RISC: 374980, Scopus: 57192644514, ResearcherID: W-2466-2017, ORCID: 0000-0001-7075-1684; maksimovain@mail.ru;

Irina V. Erofeeva — Candidate of Technical Sciences, Senior Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Geoinformatics; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 5569-3057, Scopus: 57191250834, ORCID: 0000-0003-1506-8502; ira.erofeeva.90@mail.ru;

Victor V. Afonin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Information Processing and Control Systems; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 101166, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Denis V. Emelyanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 624423, Scopus: 56296810000, ResearcherID: U-5081-2019, ORCID: 0000-0001-8087-3378; emelyanoffdv@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.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 627.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1483-1492

Термонапряженное состояние приконтактной зоны возводимого бетонного массива

Николай Алексеевич Анискин¹, Нгуен Чонг Чык²

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

² *Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куи Дона; г. Ханой, Вьетнам*

АННОТАЦИЯ

Введение. Приконтактная область бетонных гравитационных плотин является чрезвычайно ответственной. В процессе бетонирования и формирования температурного режима в ней могут возникать значительные температурные градиенты и растягивающие напряжения, что может привести к образованию температурных трещин. Практика наблюдений за возведением и эксплуатацией бетонных гравитационных плотин свидетельствует о частом образовании вертикальных трещин, направленных как вдоль, так и поперек оси плотины, что неблагоприятно для статической работы. Несмотря на большое количество выполненных научных исследований, часть из которых иллюстрируется в работе, вопрос о степени влияния модуля упругости основания на термонапряженное состояние бетонного массива до конца не решен. Цель исследования — расширение представления о формировании напряженно-деформированного состояния в области, близкой к контакту возводимого бетонного массива с основанием в зависимости от его жесткости.

Материалы и методы. Использован численный метод конечных элементов по программному комплексу MIDAS.

Результаты. Выполнен анализ влияния жесткости основания на термонапряженное состояние приконтактной зоны возводимого бетонного массива. Рассмотрено несколько вариантов с различными соотношениями модуля упругости основания и бетонного массива для вариантов возведения бетонного массива из вибрированного и укатанного бетонов. Проведено сравнение результатов по возникающим напряжениям. Получены математические выражения для прогноза максимальных растягивающих напряжений, возникающих в приконтактной зоне.

Выводы. Более жесткое основание вызывает увеличение максимальных растягивающих температурных напряжений, что повышает риск появления температурных трещин. Полученные результаты исследований можно использовать для прогноза уровня максимальных растягивающих напряжений вблизи контактного сечения бетонных массивов с размерами, близкими к размерам рассмотренной конструкции, и аналогичными условиями возведения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетонный массив, температурный режим, термонапряженное состояние, приконтактная зона, жесткость основания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык. Термонапряженное состояние приконтактной зоны возводимого бетонного массива // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1483–1492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1483-1492

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, aniskin@mgsu.ru.

The thermal stress state arising in the contact area of mass concrete during construction

Nikolai A. Aniskin¹, Nguyen Trong Chuc²

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

² *Le Quy Don Technical University of Science and technology; Hanoi, Vietnam*

ABSTRACT

Introduction. The contact area of concrete gravity dams is of vital importance. Substantial temperature gradients and tensile stresses can arise in the process of concrete casting and thermal regime creation; they can cause thermal cracking. The practice of monitoring the construction and operation of concrete gravity dams has identified frequent vertical cracking along and across the dam axis, which can have an adverse impact on structural behaviour. Despite the large number of research works, some of which are mentioned in the work, the extent of influence of the modulus of elasticity in the bed on the thermally stressed state of mass concrete has yet to be fully resolved. The purpose of the research is to enhance the insight into the stress-strain state arising in the contact area of mass concrete and the bed, depending on its rigidity.

Materials and methods. The research was conducted using the numerical finite element method and the MIDAS software package.

Results. The influence of bed rigidity on the thermally stressed state arising in the contact area of mass concrete in the process of construction has been analyzed. Several options featuring different ratios between the modulus elasticity of the bed and mass

concrete were considered in respect of a mass concrete structure made of vibrated and rolled concretes. Emerging stresses are compared. Mathematical expressions are obtained to project maximum tensile stresses occurring in the contact area.

Conclusions. A more rigid bed rises maximum tensile temperature stresses, which increase the risk of thermal cracking. Research results can be used to predict maximum tensile stresses near the contact section of the mass concrete, whose dimensions are close to those of the structure under research

KEYWORDS: mass concrete, thermal regime, thermal stress state, contact area, bed rigidity

FOR CITATION: Aniskin N.A., Nguyen Trong Chuc. The thermal stress state arising in the contact area of mass concrete during construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1483-1492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1483-1492 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Aniskin, aniskin@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве массивных бетонных плотин большое внимание уделяется зоне вблизи контакта сооружения с основанием, состояние которой во многом обеспечивает выполнение условий прочности и устойчивости плотины [1, 2]. Формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) приконтактной зоны начинается формироваться с момента начала возведения сооружения и зависит от множества факторов. В строительный период одно из основных воздействий — температурное влияние, вызванное температурой окружающей среды и экзотермическим разогревом бетона вследствие гидратации цемента [3, 4]. Одна из ключевых проблем, требующих решения при проектировании и возведении бетонных гравитационных плотин, — снижение риска температурного трещинообразования. В процессе бетонирования и формирования температурного режима в приконтактной зоне могут появляться значительные температурные градиенты и растягивающие напряжения. Они могут привести к образованию температурных трещин. Практика наблюдений за строительством и эксплуатацией бетонных гравитационных плотин свидетельствует о частом образовании вертикальных трещин, направленных как вдоль, так и поперек оси плотины, что неблагоприятно для статической работы сооружения [5, 6]. Для сведения: к минимуму риска образования таких трещин необходимо предусмотреть меры по регулированию температурного режима возводимого сооружения совместно с основанием [6, 7].

На температурный режим и термонапряженное состояние возводимого бетонного массива влияют климатические и технологические факторы. Климатические факторы — это температура воздуха и основания, солнечная радиация. К технологическим относятся расход цемента и его термичность, интенсивность создания и толщина укладываемых слоев бетона, температура укладываемой бетонной смеси и специальные мероприятия по борьбе с температурным трещинообразованием (например, использование теплоизоляции, трубное или поверхностное охлаждение и т.д.) [8–10].

Помимо отмеченных факторов, на НДС зоны вблизи контакта сооружения с основанием влияют

ее конструкция, размеры и соотношение жесткостей конструкции и основания.

Изучению воздействия жесткости основания на НДС приконтактной области (в том числе и с учетом температурных влияний) посвящено большое количество исследований [6, 11, 12].

Величина горизонтального температурного напряжения, возникающего в центре возводимого бетонного массива высотой H и длиной L , вызванного экзотермическим нагревом внутренних зон и равномерным охлаждением его поверхностей, может быть приближенно определена как [12–14]:

$$\sigma_x = K_p E_6 \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где R — коэффициент заземления, зависящий от соотношения H/L и $n = E_6/E_{\text{осн}}$; K_p — коэффициент релаксации напряжений вследствие ползучести бетона; E_6 — модуль упругости бетона; α — коэффициент линейного расширения бетона; ΔT — температурный перепад между центром и поверхностью массива; $E_{\text{осн}}$ — модуль упругости основания.

Условие предотвращения температурных трещин может быть записано в виде [6, 15]:

$$\sigma_x \leq R_t/K, \quad (2)$$

где R_t — прочность бетона на растяжение; K — коэффициент запаса.

Из зависимости (1) следует, что снижение возникающих в строительный период в приконтактной зоне напряжений возможно путем регулирования температурного перепада ΔT за счет комплекса специальных мероприятий по регулированию температурного режима [12, 14, 15] и снижения коэффициента заземления R .

Изучению этого параметра посвящено большое количество исследований. Так, в работах [16, 12] с использованием функции напряжений была решена задача о термонапряженном состоянии бетонного блока на жестком основании при различном соотношении высоты блока к его ширине H/L и определены значения коэффициента заземления. Аналогичные исследования с применением функции напряжения и теории ползучести бетона выполнены в труде [17]. Были определены температурные напряжения в приконтактной области бетонного блока при равномерном охлаждении для случая равенства модулей упругости бетона и основания и равенства ширины и высоты массива ($H/L = 1$, $n = E_6/E_{\text{осн}} = 1$).

Зона растягивающих горизонтальных напряжений по центральной вертикальной оси блока составляет $\sim 0,35H$. В работе [12] с использованием метода конечных элементов (МКЭ) проведены расчеты температурных напряжений в бетонном блоке при $H/L = 1$ и различных значениях $n = E_6/E_{осн}$ (принимались значения 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 и 4,0). Показано, что влияние жесткости основания проявляется в зоне контакта высотой от основания до $0,4L$ (L — ширина блока). Для рассмотренного случая предложена формула с целью определения коэффициента защемления в центральной точке контактного сечения в зависимости от соотношения $E_6/E_{осн}$ [12]:

$$R = \exp\left[-0,58\left(E_6/E_{осн}\right)^{0,60}\right]. \quad (3)$$

Вопросам взаимодействия упругого основания с бетонным блоком на базе теории термоупругости посвящены работы [18, 19]. Решение задачи о термонапряженном состоянии бетонного массива в процессе строительства является весьма сложным и трудоемким. Оно требует решения нестационарной температурной задачи, учета изменения во времени, влияющих на процесс параметров: тепловыделения цемента, модуля упругости бетона и его соотношения с модулем упругости основания, прочностных характеристик бетона. Это вызвало появление доступных инженерных методов расчета. Один из этих методов представлен в публикации [13]. Главное допущение этого метода заключается в учете осредненных по всему временному интервалу используемых величин. В этом случае величина максимального температурного напряжения в блоке бетонирования может быть определена следующим образом [13]:

$$\sigma_{\max} = \alpha E_6^{\text{cp}} \Delta T_6^{\text{cp}} K_{з.ср} K_{р.ср} R_p \leq R_p / K_{тр}, \quad (4)$$

где E_6^{cp} — осредненный по временному интервалу модуль упругости бетона; ΔT_6^{cp} — температурный перепад средних температур в блоке; $K_{з.ср}$ — осредненный коэффициент защемления; $K_{р.ср}$ — осредненный коэффициент релаксации; R_p — прочность бетона на растяжение; $K_{тр}$ — коэффициент запаса на трещинообразование.

Учет жесткости основания в этом методе заключается в использовании в формуле (4) осредненного по временному интервалу коэффициента защемления $K_{з.ср}$, зависящего от соотношения модулей упругости бетона и основания ($n = E_6/E_{осн}$) соотношений размеров блока H/L .

В работе [20] на основе разработанного метода конечных полос [19, 21], являющегося разновидностью МКЭ, рассматривалось термонапряженное состояние бетонного блока при соотношениях модулей упругости бетона и основания $E_6/E_{осн}$, равное 1 и 0,1. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии модуля упругости основания на температурные напряжения в бетонном блоке.

Несмотря на значительный интерес и множество выполненных ранее работ и исследований, вопрос о степени влияния модуля упругости основания на термонапряженное состояние бетонного массива до конца не решен. Данная работа выполнена с целью расширения представления о формировании НДС в области, близкой к контакту возводимого бетонного массива с основанием в зависимости от его жесткости. В статье приведены результаты численных исследований термонапряженного состояния возводимого бетонного массива на основании с различными значениями модуля упругости. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Midas Civil на основе МКЭ [22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривалось изменение температурного режима и термонапряженного состояния в области, близкой к контакту возводимого бетонного массива с основанием. Моделировалось послойное возведение бетонного массива, имеющего размеры в плане 25×15 м и высоту 30 м на скальном основании. Расчетная схема исследуемой конструкции с частью рассмотренной области основания на момент окончания ее возведения представлена на рис. 1. Для исключения влияния граничных условий на полученные результаты область основания имела размер, равный двум высотам массива по высоте и в боковых примыканиях.

Исследовано два варианта возведения массива: из укатанного (УБ) и вибрированного (ВБ) бетонов. Принимались следующие исходные данные. Для УБ: расход цемента Π — 125 кг/м^3 ; толщина укладываемого слоя Δ — $0,9 \text{ м}$; максимальное тепловыделение цемента $\Theta_{\max}$ — 235 кДж/кг . Для ВБ: Π — 325 кг/м^3 ; Δ — $3,25 \text{ м}$; $\Theta_{\max}$ — 235 кДж/кг . Температура укладываемой бетонной смеси для обоих вариантов принималась равной $t_{\text{уклад}}$ — $17,5^\circ\text{C}$. Рас-

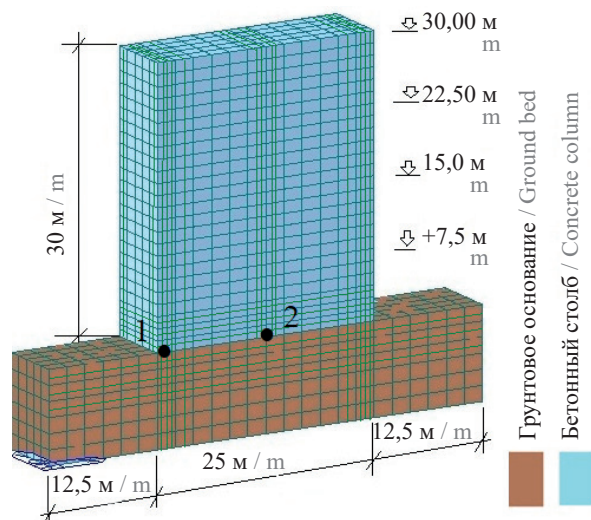


Рис. 1. Расчетная схема массива

Fig. 1. The computational pattern for a mass concrete structure

сма тривало сь возведение при постоянной температуре воздуха, равной 26,5 °С. Температура основания принималась 25 °С.

Рассмотрены следующие значения соотношения модулей упругости бетона и основания: $n = E_6/E_{\text{осн}} = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0$ и $5,0$ (E_6 — предельное значение модуля упругости бетона; $E_{\text{осн}}$ — модуль упругости основания).

Использованные в расчетах теплофизические характеристики материалов расчетной области приведены в табл. 1.

Изменение во времени модуля упругости бетона и его прочности на сжатие и растяжение представлены в табл. 2 [5].

Для решения задач по определению температурного режима и термонапряженного состояния исследуемой системы «бетонный массив — основание» использовался программный комплекс Midas Civil, основанный на МКЭ¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате решения нестационарной температурной задачи были получены поля температур на расчетные моменты времени с учетом соответствующего этапа возведения бетонного массива. Картины распре-

¹ MIDAS Information Technology, Heat of Hydration — Analysis Analysis Manual, Version 2011. 48 p.

Табл. 1. Теплофизические характеристики бетонного массива и основания

Table 1. Thermophysical characteristics of the mass concrete and the bed

Характеристики Characteristics	УБ, М150 RC (rolled concrete), M150	ВБ, М300 VC (vibrated concrete), M300	Основание Bed
Коэффициент теплопроводности, Вт/м°С Coefficient of thermal conductivity, W/m°С	2,33	2,33	3,61
Удельная теплоемкость, кДж/кг°С Specific heat capacity, kJ/kg°С	0,95	0,95	0,85
Удельный вес, кг/м³ Specific gravity, kg/m³	2400	2400	2600
Коэффициент теплопередачи, Вт/м²°С Heat transfer coefficient, W/m²°С	13,50	13,50	14,46
Модуль упругости в пределах, МПа Modulus of elasticity within the limits, MPa	$2,4 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$n = E_6/E_{\text{осн}}$ $n = E_{\text{con}}/E_{\text{bed}}$
Коэффициент температурного расширения, 1/°С Coefficient of thermal expansion, 1/°С	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,20	0,20	0,28

Табл. 2. Изменение прочности бетона на сжатие, растяжение и модуля упругости во времени

Table 2. A change in concrete compressive strength, tensile strength and the modulus of elasticity over time

Номер Number	Возраст бетона, сут Age of concrete, days	3	7	28	90	180	360
УБ М150 RCC, M150	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	3,16	7,42	14,30	18,71	20,62	22,09
	Прочность на растяжение, МПа Tensile strength, MPa	0,39	0,60	0,83	0,95	0,99	1,03
	Модуль упругости E , ГПа Modulus of elasticity E , GPa	8,00	14,34	20,78	22,91	23,48	23,79
ВБ М300 UB, M300	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	11,52	18,95	27,80	32,52	34,42	35,83
	Прочность на растяжение, МПа Tensile strength, MPa	0,94	1,17	1,39	1,49	1,53	1,56
	Модуль упругости E , ГПа Modulus of elasticity E , GPa	10,91	19,72	28,66	31,63	32,42	32,85

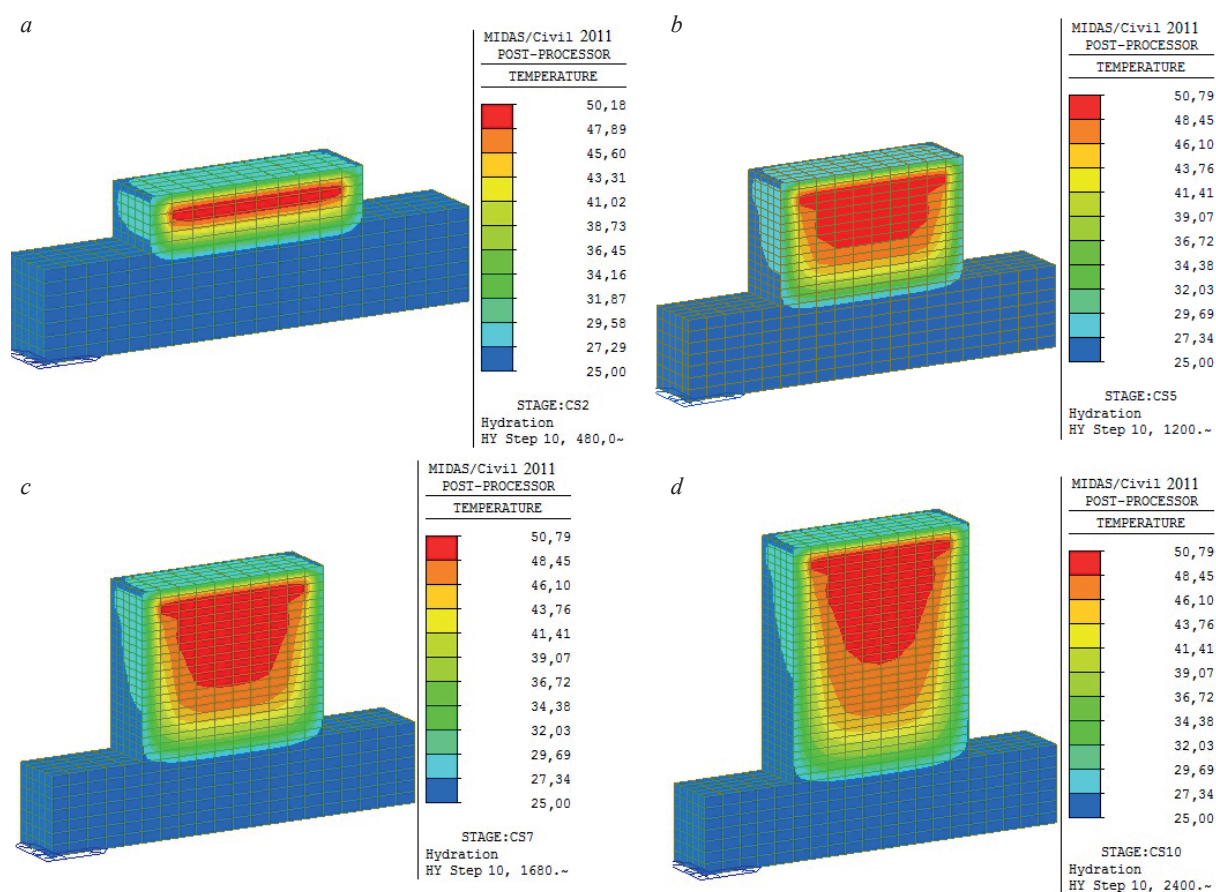


Рис. 2. Температурный режим возводимого бетонного массива (вариант ВБ): *a* — на момент времени 480 ч после начала возведения (высота массива 6,0 м); *b* — на момент времени 1680 ч после начала возведения (высота массива 21,0 м); *c* — на момент времени 1200 ч после начала возведения (высота массива 15,0 м); *d* — на момент времени 42 400 ч после начала возведения (высота массива 30,0 м)

Fig. 2. The temperature regime of concrete mass during construction (VB Option): *a* — 480 hours after the start of construction (concrete mass height — 6.0 m); *b* — 1,680 hours after the start of construction (concrete mass height — 21.0 m); *c* — 1,200 hours after the start of construction (concrete mass height — 15.0 m); *d* — 42,400 hours after the start of construction (concrete mass height — 30.0 m)

деления температуры в массиве, возводимом из ВБ на некоторые моменты времени, показаны на рис. 2. Можно отметить, что зоны с наиболее высокими температурами формируются в центре бетонного массива и достигают 50,79 °С. К моменту окончания рассматриваемого временного интервала (100 суток после начала укладки) в приконтактной области сохраняется достаточно высокая температура в интервале 36,0–45,5 °С, на верхних отметках температура достигает максимума в 50,79 °С. После нагрева массива происходит постепенное снижение температуры, вызванное отводом тепла через поверхности массива, контактирующие с воздухом и основанием.

Для варианта с УБ уровень температурного разогрева массива несколько ниже: в прискальной области температура достигает значений в интервале 28,9–35,5 °С, в центре массива максимальная температура равна 39,48 °С.

В результате решения задач по определению НДС наращиваемого массива на каждом шаге

по времени было получено распределение напряжений в расчетной области и установлены значения максимальных растягивающих напряжений, возникающих по контакту массива с основанием.

На рис. 3, 4 показаны картины распределения максимальных напряжений от воздействия температуры в приконтактной области для варианта из ВБ в случае «жесткого» ($n = E_g/E_{осн} = 0,5$) и «мягкого» основания ($n = E_g/E_{осн} = 5,0$) на моменты времени 240 и 2400 ч после начала укладки бетона.

На рис. 5 представлены графики изменения во времени максимального напряжения, возникающего в контактном сечении конструкции в точках на краю массива и его центре. Положение точек показано на рис. 1 для варианта возведения из ВБ при соотношениях модулей упругости $n = 0,5$ («жесткое» основание, рис. 5, *a*) и $n = 5,0$ («мягкое» основание, рис. 5, *b*).

Величины максимальных растягивающих температурных напряжений на контакте бетонного

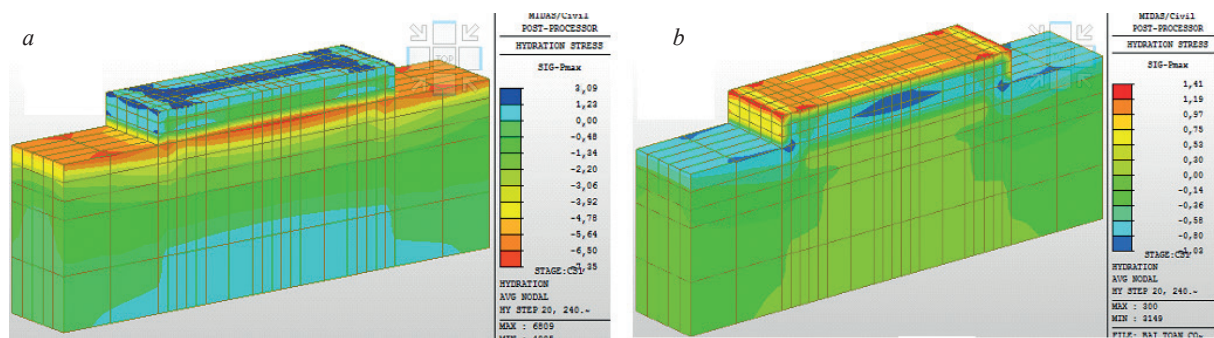


Рис. 3. Распределение максимальных температурных напряжений в приконтактной зоне на момент времени 240 часов после начала укладки вибрированного бетона: а — для $n = E_6/E_{очн} = 0,5$; б — для $n = E_6/E_{очн} = 5$

Fig. 3. The distribution of maximum temperature stresses in the contact area 240 hours after the start of vibrated concrete casting: а — for $n = E_{con}/E_{bed} = 0.5$; б — for $n = E_{con}/E_{bed} = 5$

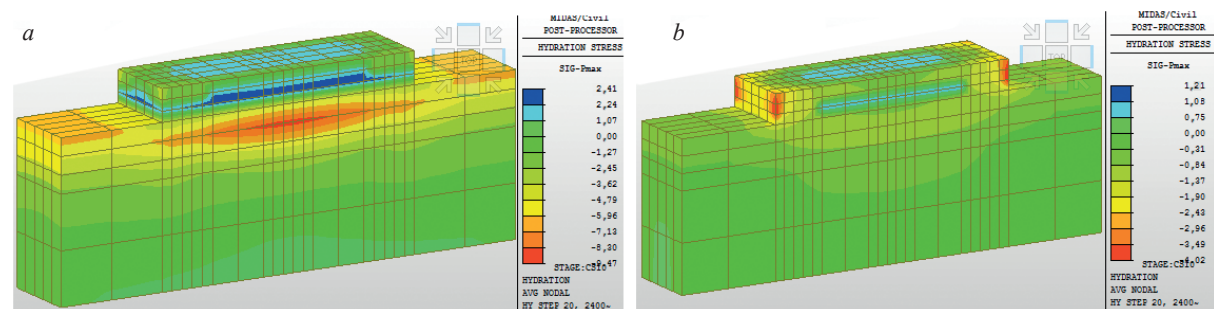


Рис. 4. Распределение максимальных температурных напряжений в приконтактной зоне на момент времени 2400 часов после начала укладки вибрированного бетона: а — для $n = E_6/E_{очн} = 0,5$; б — для $n = E_6/E_{очн} = 5$

Fig. 4. The distribution of maximum temperature stresses in the contact area 2,400 hours after the start of vibrated concrete casting: а — for $n = E_{con}/E_{bed} = 0.5$; б — for $n = E_{con}/E_{bed} = 5$

массива и точка их возникновения (точка 1 на краю массива и точка 2 в его центре на рис. 1) для вариантов из УБ и ВБ при разных соотношениях модулей упругости бетона и основания приведены в табл. 3.

Анализируя полученные данные для варианта ВБ, можно отметить следующее. Для случая «жесткого» основания (рис. 3, а; 4, а; 5, а) после укладки бетона начинается процесс нагрева конструкции вследствие экзотермического разогрева, что приводит к возникновению сжимающих напряжений (~1,9 МПа в центре сечения и ~–1,0 МПа на краю). Затем, по мере охлаждения боковых поверхностей массива и набора прочности бетона к моменту времени 240 ч на краю контакта возникают растягивающие напряжения 3,08 МПа. За счет достаточно быстрого охлаждения поверхности напряжения на краю контакта становятся сжимающими в интервале от –3,4 до –2,0 МПа. В центре массива сжимающие напряжения постепенно уменьшаются до 0 на момент времени ~540 ч, и далее возникают растягивающие напряжения, увеличивающиеся до 2,8 МПа к моменту времени 2400 суток.

В случае «мягкого» основания (рис. 3, б; 4, б; 5, б) величины максимальных напряжений значительно меньше и достигают величин для цен-

тральной зоны контакта от сжимающих напряжений –1,2 МПа до растягивающих 1,1 МПа.

Такая же качественная картина изменения термонапряженного состояния вблизи контакта бетонного массива с основанием наблюдается и для варианта с УБ с более низким уровнем напряжений (табл. 3).

По результатам обработки расчетов были получены уравнения регрессии второй степени и построены графики функций изменения максимальных растягивающих напряжений в зависимости от соотношения модулей упругости бетона и основания n (рис. 6):

- для вибрированного бетона получено уравнение:

$$\sigma_{\max} = 3,42 - 1,23n + 0,17n^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,916; \quad (5)$$

- для укатанного бетона уравнение:

$$\sigma_{\max} = 1,85 - 0,56n + 0,06n^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,959. \quad (6)$$

Полученные для функций (5), (6) коэффициенты детерминации R^2 близки к единице, что говорит о хорошей степени соответствия функций и результатов численных экспериментов.

На рис. 6 показаны точки функции, соответствующие допустимым значениям по растягивающим напряжениям для ВБ и УБ. Эти значения равны соответственно 1,6 МПа (ВБ) и 1,03 МПа

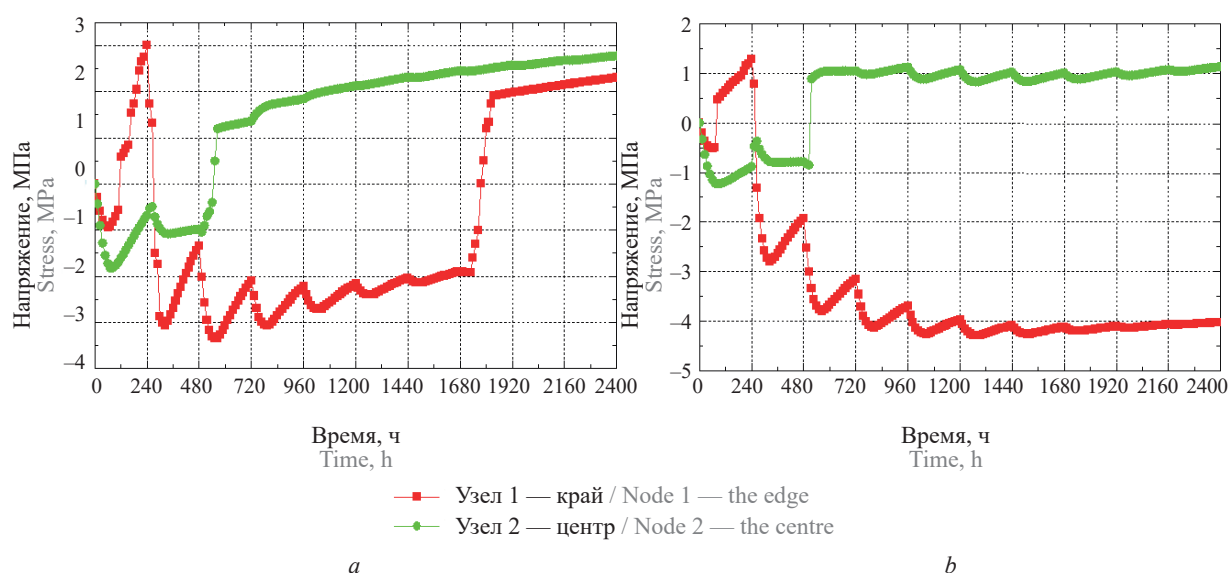


Рис. 5. График изменения во времени максимального растягивающего напряжения в узлах на контакте сооружения с основанием при возведении массива из ВБ: *a* — для $n = E_o/E_{och} = 0.5$; *b* — для $n = E_o/E_{och} = 5$

Fig. 5. The time graph of maximum tensile stresses in the nodes of the contact area between the structure and the bed during the construction of a vibrated mass concrete structure: *a* — for $n = E_o/E_{och} = 0.5$; *b* — for $n = E_o/E_{och} = 5$

Табл. 3. Значения максимальных растягивающих напряжений

Table 3. Values of maximum tensile stresses

$n = E_o/E_{och} / n = E_{con}/E_{bed}$		0,5	1	2	3	4	5
Максимальное растягивающее напряжение σ_{max} Maximum tensile stress σ_{max}	УБ RC	1,51	1,49	0,87	0,72	0,63	0,57
	ВБ VC	3,08	2,10	1,45	1,37	1,33	1,33

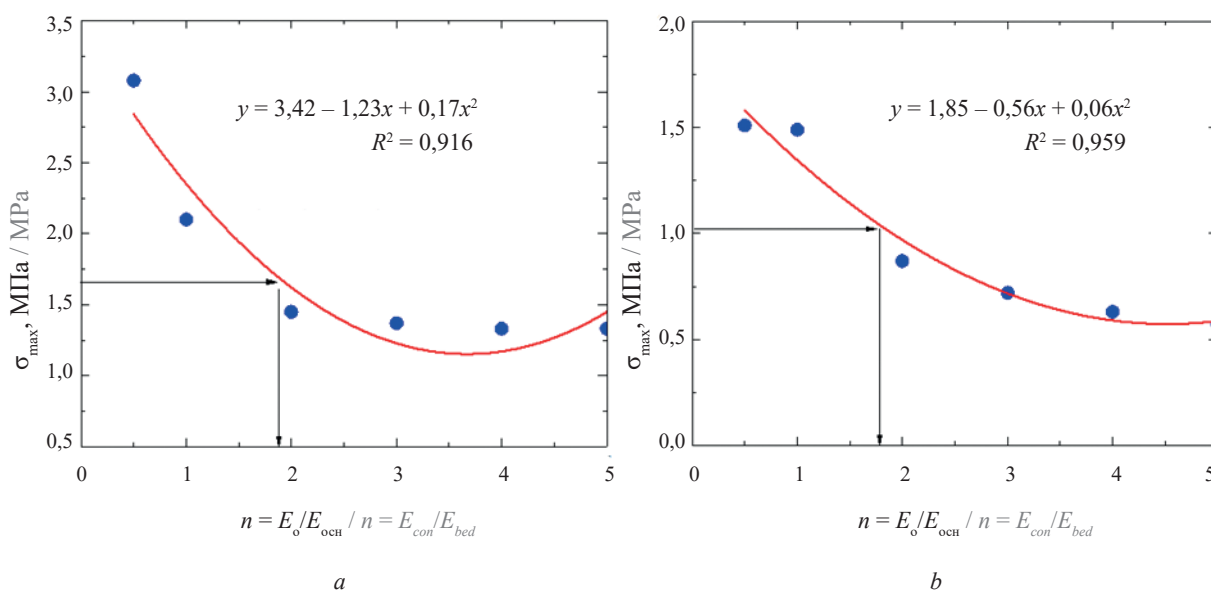


Рис. 6. График зависимости между максимальным значением растягивающего напряжения и отношением $n = E_o/E_{och}$: *a* — для укатанного бетона; *b* — для вибрированного бетона

Fig. 6. The graph of dependency between the maximum tensile stress value and ratio $n = E_o/E_{och}$: *a* — for rolled concrete (RC); *b* — for vibrated concrete (VC)

(УБ). Согласно графикам на рис. 6 можно отметить, что при достаточно жестком основании ($n \leq 1,8$) по контакту конструкции с рассмотренными размерами будут возникать максимальные растягивающие напряжения, превышающие нормативные значения, что может вызвать нежелательное трещинообразование. Избежать этого возможно при использовании дополнительных технологических мероприятий [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- модуль упругости основания существенно влияет на термонапряженное состояние приконтактной области бетонного массива. Более жесткое основание вызывает увеличение максимальных растягивающих температурных напряжений, что повышает риск возникновения температурных трещин;
- полученные результаты исследований и на их основе уравнения регрессии и графики можно использовать для прогноза уровня максимальных растягивающих напряжений вблизи контактного сечения бетонных массивов с размерами, близкими к размерам рассмотренной конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анискин Н.А., Чык Н.Ч., Брянский И.А., Хынг Д.Х. Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов // Вестник МГСУ. 2018. Vol. 13. Pp. 1407–1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418
2. Zhang Y., Pan J., Sun X., Feng J., Sheng D., Wang H. et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions // Engineering Structures. 2021. Vol. 230. P. 111721. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111721
3. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2021/5541181
4. Lin P., Peng H., Fan Q., Xiang Y., Yang Z., Yang N. A 3D thermal field restructuring method for concrete dams based on real-time temperature monitoring // KSCE Journal of Civil Engineering. 2021. Vol. 25. Issue 4. Pp. 1326–1340. DOI: 10.1007/s12205-021-1084-8
5. Aniskin N., Nguyen T.C. Prediction of thermal stress in a concrete gravity dam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012144. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012144
6. Гришин М., Розанов Н. Бетонные плотины (на скальных основаниях). М.: Стройиздат, 1975. 352 с.
7. Aniskin N., Nguyen T.C. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04059. DOI: 10.1051/mateconf/201819604059
8. Nikolenko S.D., Sazonova S.A., Zvyagintseva A.V. Calculation of crack formation during the thermal stress state of concrete masses and development of measures to improve the operational properties of concrete // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. Issue 3. P. 032028. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032028
9. Leon G., Chen H.-L. Thermal analysis of mass concrete containing ground granulated blast furnace slag // ICE Proceedings Civil Engineering. 2021. Vol. 2. Issue 1. Pp. 254–271. DOI: 10.3390/civileng2010014
10. Moon H., Ramanathan S., Suraneni P., Shon C.-S., Lee C.-J., Chung C.-W. Revisiting the effect of slag in reducing heat of hydration in concrete in comparison to other supplementary cementitious materials // Materials. 2018. Vol. 11. Issue 10. P. 1847. DOI: 10.3390/ma11101847
11. Aniskin N.A., Nguyen T.C., Duc Anh L. Influence of the elastic modulus of the bed on the thermal stress state of a concrete block // Power Technology and Engineering. 2020. Vol. 54. Issue 12. DOI: 10.1007/s10749-020-01156-4
12. Bofang Z. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Published by Elsevier Inc., 2014. 487 p.
13. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. М.: Изд-во АСБ, 2012. 485 с.
14. Bofang Z., Tongshen W., Baoying D., Zhizhang G. Thermal stresses and temperature control of hydraulic concrete structures (in Chinese). Beijing, China Water Power Press, 1976.
15. Рассказов Л.Н. и др. Гидротехнические сооружения. М.: Изд-во АСБ, 2011. 533 с.
16. Schleeh W. Die Zwängspannungen in wall disks held on one side by grease // Concrete and Reinforced Concrete. 1962. Vol. 57. Issue 3.
17. Zienkiewicz O.C. The computation of shrinkage and thermal stresses in massive structures // ICE Proceedings. 1955. Pp. 1–4. DOI: 10.1680/ICEP.1955.11317
18. Храпков А.А. Некоторые результаты статического расчета отдельных типов сооружений на ЭЦВМ «Урал-2» // Известия ВНИИГ. 1966. Т. 81. С. 155–169.
19. Трапезников Л.П., Угольников Л.А. Температурные напряжения в бетонных блоках на бетонном основании // Известия ВНИИГ. 1969. Т. 92. С. 105–124.

20. Крат Т.Ю., Рукавишников Т.Н. Оценка температурного режима и термонапряженного состояния блоков водослива при различных условиях бетонирования // Известия ВНИИГ. 2007. Т. 248. С. 77–85.

21. Крайнов А.Ю. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса : учебное пособие. Томск, 2016. 92 с.

22. Khalifah H.A., Rahman M.K., Al-Helal Z., Al-Ghamdi S. Stress Generation in mass concrete blocks

with fly ash and silica fume — an experimental and numerical study // Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2016. DOI: 10.18552/2016/SCMT4S267

23. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature regime and thermal stress in a concrete massif with pipe cooling // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 52. Issue 6. Pp. 1–6. DOI: 10.1007/s10749-019-01009-9

Поступила в редакцию 24 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор; директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; aniskin@mgsu.ru;

Нгуен Чонг Чык — кандидат технических наук, профессор, преподаватель-исследователь; **Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона**; Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 100; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; ntchuc.mta198@gmail.com.

Вклад авторов:

Анискин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, доработка текста, итоговые выводы.

Нгуен Чонг Чык — проведение расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aniskin N.A., Nguyen Trong Chuc, Bryansky I.A., Dam Huu Hung. Determination of the temperature field and thermal stress state of the massive of stacked concrete by finite element method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(11):1407-1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418 (rus.).

2. Zhang Y., Pan J., Sun X., Feng J., Sheng D., Wang H. et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions. *Engineering Structures*. 2021; 230:111721. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111721

3. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021:1-16. DOI: 10.1155/2021/5541181

4. Lin P., Peng H., Fan Q., Xiang Y., Yang Z., Yang N. A 3D thermal field restructuring method for concrete dams based on real-time temperature monitoring. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021; 25(4):1326-1340. DOI: 10.1007/s12205-021-1084-8

5. Aniskin N., Nguyen T.C. Prediction of thermal stress in a concrete gravity dam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012144. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012144

6. Grishin M., Rozanov N. *Concrete dams (on rocky foundations)*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 352. (rus.).

7. Aniskin N., Nguyen T.C. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04059. DOI: 10.1051/mateconf/201819604059

8. Nikolenko S.D., Sazonova S.A., Zvyagintseva A.V. Calculation of crack formation during the thermal stress state of concrete masses and development of measures to improve the operational properties of concrete. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021; 1079(3):032028. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032028

9. Leon G., Chen H.-L. Thermal analysis of mass concrete containing ground granulated blast furnace slag. *ICE Proceedings Civil Engineering*. 2021; 2(1):254-271. DOI: 10.3390/civileng2010014

10. Moon H., Ramanathan S., Suraneni P., Shon C.-S., Lee C.-J., Chung C.-W. Revisiting the effect of slag in reducing heat of hydration in concrete in comparison to other supplementary cementitious materials. *Materials*. 2018; 11(10):1847. DOI: 10.3390/ma11101847

11. Aniskin N.A., Nguyen T.C., duc Anh L. Influence of the elastic modulus of the bed on the thermal

stress state of a concrete block. *Power Technology and Engineering*. 2020; 54(12). DOI: 10.1007/s10749-020-01156-4

12. Bofang Z. *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Published by Elsevier Inc., 2014; 487.

13. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinsky M.V. *Hydraulic engineering works. Part 1*. Moscow, ASV Publishing House, 2012; 485. (rus.).

14. Bofang Z., Tongshen W., Baoying D., Zhizhang G. *Thermal Stresses and Temperature Control of Hydraulic Concrete Structures (in Chinese)*. Beijing, China Water Power Press, 1976.

15. Rasskazov L.N. et al. *Hydraulic structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2011; 533. (rus.).

16. Schleeh W. Die Zwängspannungen in wall disks held on one side by grease. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1962; 57(3).

17. Zienkiewicz O.C. The computation of shrinkage and thermal stresses in massive structures. *ICE Proceedings*. 1955; 1-4. DOI: 10.1680/II-CEP.1955.11317

18. Khrapkov A.A. Some results of static calculation of certain types of structures on the Ural-2 computer. *Izvestia VNIIG*. 1966; 81:155-169. (rus.).

19. Trapeznikov L.P., Ugolnikov L.A. Temperature stresses in concrete blocks on a concrete base. *Izvestiya VNIIG*. 1969; 92:105-124. (rus.).

20. Krat T.Yu., Rukovishnikova T.N. Assessment of temperature regime and thermo-stressed state of spillway units at different concreting conditions. *Izvestiya VNIIG*. 2007; 248:77-85. (rus.).

21. Krainov A.Yu. *Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer: a tutorial*. Tomsk, 2016; 92. (rus.).

22. Khalifah H.A., Rahman M.K., Al-Helal Z., Al-Ghamdi S. Stress Generation in mass concrete blocks with fly ash and silica fume — an experimental and numerical study. *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2016. DOI: 10.18552/2016/SCMT4S267

23. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature regime and thermal stress in a concrete massif with pipe cooling. *Power Technology and Engineering*. 2019; 52(6):1-6. DOI: 10.1007/s10749-019-01009-9

Received June 24, 2021.

Approved for publication on September 27, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

B I O N O T E S: **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydraulic and Power Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; aniskin@mgsu.ru;

Nguyen Trong Chuc — Candidate of Technical Sciences, research teacher; **Le Quy Don Technical University of Science and technology**; 100 Hoang Kuok st., Hanoi, Vietnam; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; ntchuc.mta198@gmail.com.

Contribution of the authors:

Aniskin N.A. — conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, supervision.

Nguyen Trong Chuc — gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 693.955

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1493-1507

Эффективность применения сборно-монолитных каркасных систем в гражданском строительстве

Мария Дмитриевна Стрелкова, Ксения Игоревна Стрелец, Виктор Захарович Величкин,
Марина Вячеславовна Петроченко

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены возможности сокращения сроков строительства, повышение производительности труда, а также вероятность снижения выбросов углекислого газа при частичной замене монолитного железобетона на сборные железобетонные изделия при строительстве жилых зданий. Представлены сочетания сборных и монолитных элементов сборно-монолитных каркасов в количестве шести различных конструктивных схем сборно-монолитных каркасов и двух вариантов монолитных каркасов. Проведены сравнения производственных затрат и комплексной трудоемкости для всех вариантов конструкции каркаса, сроков строительства на 1000 м³ жилого здания для различных конструктивных вариантов исполнения каркаса, а также оценка возможности снижения выбросов углекислого газа при изменении объема сборного железобетона в каркасной схеме здания.

Материалы и методы. В качестве метода определения оптимального варианта сборно-монолитного каркаса для строительства жилого здания по средневзвешенному показателю предложена разработанная методика, которая включает такие относительные показатели, как производственные затраты, комплексная трудоемкость, сроки строительства и процент снижения выбросов углекислого газа на 1000 м³ каркаса.

Результаты. Выбрана оптимальная конструктивная схема сборно-монолитного каркаса здания, рассчитанная по средневзвешенному показателю. Определена наиболее эффективная каркасная конструкция по средневзвешенному показателю. По результатам расчета сборно-монолитный каркас «АРКОС» со сборными колоннами лидирует по средневзвешенному значению и больше всего подходит для строительства жилого здания. Если рассматривать каждый из выбранных показателей в отдельности, то следует выбрать каркас «РЕКОН» со сборным перекрытием, однако при расчете средневзвешенного показателя каркас «РЕКОН» уступает каркасу «АРКОС», это связано с различными весовыми коэффициентами для каждого из критериев оценки.

Выводы. Доказана целесообразность применения сборно-монолитных каркасных систем для строительства жилого здания, по сравнению с монолитными каркасами, выбрана оптимальная схема каркаса по предложенной методике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сборные железобетонные конструкции, сборный бетон, сборные бетонные элементы, железобетон, сборные бетонные элементы, узлы, соединения элементов, бетонная конструкция, сборно-монолитный каркас, монолитный каркас, производственные затраты, трудоемкость, сроки строительства, выбросы углекислого газа

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стрелкова М.Д., Стрелец К.И., Величкин В.З., Петроченко М.В. Эффективность применения сборно-монолитных каркасных систем в гражданском строительстве // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1493–1507. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1493-1507

Автор, ответственный за переписку: Мария Дмитриевна Стрелкова, strelkova.marya2015@gmail.com.

The application efficiency of precast monolithic frame systems in civil engineering

Mariia D. Strelkova, Ksenia I. Strelets, Victor Z. Velichkin, Marina V. Petrochenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The partial replacement of cast-in-situ concrete with precast concrete in the residential construction sector allows to reduce construction time and cost, increase labour productivity and cut CO₂ emissions. Combinations of prefabricated and monolithic elements in precast monolithic frames are presented; they encompass 6 different structural options of precast monolithic frames and 2 types of monolithic frames. The co-authors compare production costs and integrated labor intensity for all frame design options, construction periods per 1,000 m³ of a residential building for various structural options of the frame, and assess potential reduction in carbon dioxide emissions due to a change in the amount of

precast reinforced concrete in the building frame structure.

Materials and methods. The co-authors have developed a method that employs weighted average to identify the optimal type of a precast monolithic frame. The method takes account of such factors as production costs, integrated labour intensity, construction time and reduction in carbon dioxide gas emissions (in per centum) per 1,000 m³ of the frame structure.

Results. The optimal structure of a precast monolithic frame was selected and calculated using weighted average. Weighted average was used to identify the most effective structural frame. The calculation results have shown that ARKOS precast monolithic frame with precast columns is the leader in terms of weighted average; it best suits the construction of a residential building. If we consider each of the selected indicators separately, RECON frame with precast floors is to be selected; however, RECON is inferior to ARKOS in terms of weighted average due to different values of the weight coefficients attached to each of the assessment criteria.

Conclusions. The co-authors have proven the efficiency of precast monolithic frame systems in comparison with monolithic frames if applied to construct a residential building. The proposed method was employed to select the optimal type of frame.

KEYWORDS: precast reinforced concrete structures, precast concrete, precast concrete elements, reinforced concrete, joints, structural connections, concrete construction, precast monolithic frame, monolithic frame, production expenses, labour intensity, construction time, carbon dioxide gas emissions

FOR CITATION: Strelkova M.D., Strelets K.I., Velichkin V.Z., Petrochenko M.V. The application efficiency of precast monolithic frame systems in civil engineering. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11): 1493-1507. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1493-1507

Corresponding author: Mariia D. Strelkova, strelkova.marya2015@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон — широко используемый материал в строительстве, он имеет ряд преимуществ, таких как высокая технологичность, широкие архитектурные возможности, снижение сроков и стоимости строительства за счет применения высоко конструкционных бетонов, бетонов для аддитивных технологий [1, 2].

При всех положительных качествах бетона важно учитывать его воздействие на окружающую среду и высокий процент выбросов углекислого газа [3, 4]. Строительная индустрия — один из ключевых загрязнителей окружающей среды [5]. Процент выбросов парниковых газов при строительстве составляет 38 % при оценке глобальных выбросов [6]. Выбросы CO₂ от применения бетона при этом — около 5 %, и состоят из энергетических затрат на производство и эксплуатацию бетона, операционных затрат [7]. Снижение выбросов на производство и эксплуатацию — сложная комплексная задача, она находится и связана с комплексными исследованиями [8], в то время как снижение выбросов от строительных технологий является перспективным направлением и обеспечивает снижение выбросов углекислого газа [9, 10]. Одна из возможностей для уменьшения выбросов при возведении бетонных сооружений — использование индустриального бетона. Замена монолитного бетона на сборные конструкции обеспечивает снижение выбросов до 32 % [6]. Одним из способов уменьшения монолитных работ при строительстве жилых зданий служит применение конструкций сборно-монолитных каркасов, что позволяет обеспечить снижение расходов строительных материалов и уменьшить выбросы парниковых газов. Вместе с этим использование разных конструктивных схем каркасов из сборного железобетона дает возможность предоставить различные степени снижения сроков строительства и трудоемкости и степень снижения выбросов парниковых газов [11, 12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данное исследование посвящено сравнению вариантов различных конструктивных схем сборно-монолитных и монолитных каркасов строительства многоэтажных жилых зданий с точки зрения трудоемкости, производственных затрат и выбросов углекислого газа на 1000 м³ каркаса. Рассмотрено сочетание сборных и монолитных элементов сборно-монолитных каркасов, которые представлены в табл. 1. В общей сложности получено 6 различных конструктивных схем сборно-монолитных каркасов и 2 варианта монолитных каркасов.

Первый вариант — это классический каркас «РЕКОН» («Чебоксарская серия»; разработчик ОАО «Чебоксарский ДСК»; прототип французская система PPB-Saret) [13].

К основным элементам каркаса «РЕКОН» относятся сборные колонны, сборно-монолитные ригели, плиты несъемной опалубки с монолитным перекрытием [6]. В узлах «колонна – ригель – перекрытие» в колонне предусмотрены участки с оголенной арматурой. Данное технологическое решение необходимо для пропуска арматуры ригеля через тело колонны с последующим замоноличиванием этого узла и образованием жесткости системы [14].

Сборно-монолитные ригели состоят из двух частей сборной нижней части, изготовленной в заводских условиях, с поперечной арматурой в верхней части в виде хомутов для обеспечения сцепления с плитами перекрытия и монолитной верхней части. В результате замоноличивания стыков «ригель – плита» образуется рабочее тавровое сечение (рис. 1) [14].

Перекрытия представляют собой сборные предварительно-напряженные железобетонные плиты (толщиной 60 мм), которые выполняют роль несъемной опалубки для устройства монолитной плиты перекрытия общей толщиной 100–190 мм [15]. Колонны соединяются по высоте вне уровня перекрытия, без сварки, при помощи «штепсельного стыка» [16].

Табл. 1. Варианты каркасов для жилого здания

Table 1. Frame options for a residential building

Номер No.	Наименование Name	Вариант конструкции Design variant			
		Колонны Columns	Ригели Crossbars	Перекрытие Overlapping	Стены Walls
1	«РЕКОН» с несъемной плитой опалубкой RECON with stay-in-place formwork	Сборные Precast	Сборно- монолитные Precast and monolithic	Сборно- монолитное Precast and monolithic	Крупносборные Large precast
2	«РЕКОН» со сборным перекрытием RECON with precast floor slab	Сборные Precast	Сборно- монолитные Precast and monolithic	Сборное Precast	Крупносборные Large precast
3	«АРКОС» со сборной колонной ARCOS with a precast column	Сборные Precast	Монолитные Monolithic	Сборное Precast	Крупносборные Large precast
4	«АРКОС» с крайними сборными и межстенными монолитными колоннами ARCOS with external precast and intermural monolithic columns	Крайние сборные внутренние монолитные External precast columns, ntermural monolithic columns	Монолитные Monolithic	Сборное Precast	Крупносборные Large precast
5	«АРКОС» с монолитными колоннами ARCOS with monolithic columns	Монолитные Monolithic	Монолитные Monolithic	Сборное Precast	Крупносборные Large precast
6	Безригельная технология Crossbar-free technology	Монолитные Monolithic	Отсутствуют None	Сборное Precast	Монолитные Monolithic
7	Монолитный каркас Monolithic frame	Монолитные Monolithic	Монолитные Monolithic	Монолитные Monolithic	Крупносборные Large precast
8	Монолитный каркас безригельный Crossbar-free monolithic frame	Монолитные Monolithic	Отсутствуют None	Монолитные Monolithic	Монолитные Monolithic

Второй вариант — это модификация каркаса «РЕКОН». «Универсальная домостроительная система» (УДС; авторы и разработчики проектно-конструкторский центр «Каркасные технологии», г. Екатеринбург; научно-производственный центр «СТРОЙТЕХ», г. Москва; прототип французская система PPB-Saret, «РЕКОН») [13].

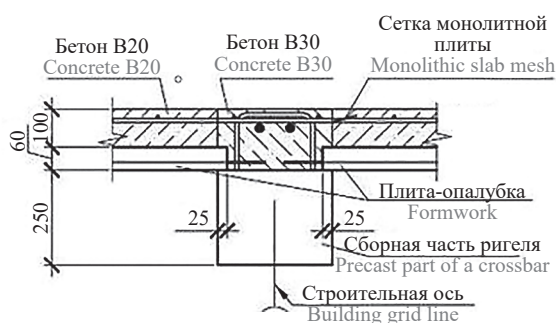


Рис. 1. Узел соединения сборно-монолитного ригеля и сборно-монолитного перекрытия каркаса «РЕКОН»

Fig. 1. The connection between a precast monolithic beam and precast monolithic floor of the RECON frame

Все элементы каркаса остаются неизменными, за исключением перекрытия. Плиты несъемной плиты опалубки с монолитным перекрытием заменяются на полностью сборное перекрытие, состоящее из сборных многопустотных плит [17]. Узел сопряжения сборно-монолитных ригелей со сборным перекрытием представлен на рис. 2 [18, 19].

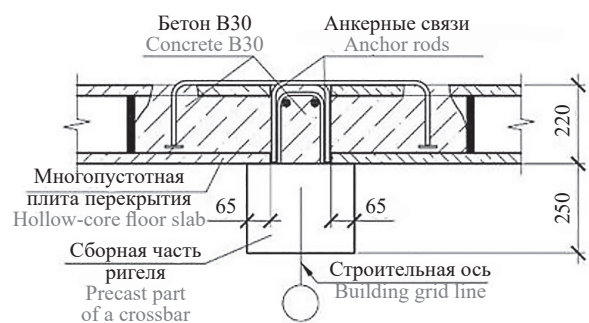


Рис. 2. Узел соединения сборно-монолитного ригеля и сборного перекрытия каркаса «РЕКОН»

Fig. 2. The connection between a precast monolithic crossbar and the precast floor of the RECON frame

Третий вариант — каркас «АРКОС». «Универсальная открытая архитектурно-строительная система многоэтажных зданий АРКОС» (Серия Б1.020.1-7; разработчик НИЭП ГП БелНИИС; прототип югославская система IMS) [13].

Каркас состоит из сборных колонн, где пустоты в уровне перекрытия так же сохраняются. Однако стык колонн вне уровня перекрытия выполняется при помощи ванной сварки. В качестве перекрытия

используются многопустотные плиты перекрытия. Ригели монолитные, выполняемые в створе с колоннами (при пролетах до 6,0 м высота несущих ригелей равна высоте сборных плит) [17]. Узел соединения монолитных ригелей и многопустотных плит перекрытия представлен на рис. 3 [18].

Четвертый вариант — тот же сборно-монолитный каркас «АРКОС», но часть колонн заменена на монолитные.

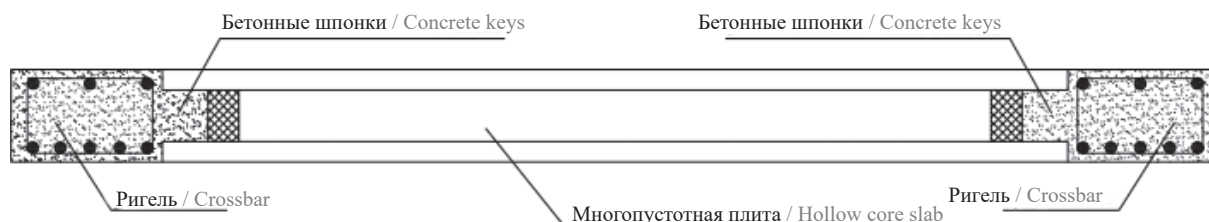


Рис. 3. Узел соединения монолитного ригеля и сборного перекрытия каркаса «АРКОС»

Fig. 3. The connection between the monolithic beam and the precast floor slab of the ARKOS frame

Пятый вариант — каркас «АРКОС» с полностью монолитными колоннами как внешними, так и внутренними.

Шестой вариант — это неполный сборно-монолитный безригельный каркас с несущими монолитными стенами как внутренними, так и наружными. Элементами каркаса являются монолитные колонны и сборные многопустотные плиты перекрытия.

Седьмой вариант — полностью монолитный каркас с монолитными колоннами, ригелями и перекрытием.

Восьмой вариант — неполный монолитный безригельный каркас с несущими монолитными стенами как внутренними, так и наружными. Элементами каркаса служат монолитные колонны и полностью монолитное перекрытие.

По каждому из вариантов рассчитаны объемы работ для типового проекта 18-этажного жилого многоквартирного дома с размерами в плане 75 × 16,1 м с высотой этажа 3 м, приведенные к 1000 м³ здания.

По каждому варианту была составлена калькуляция трудоемкости работ, в рамках которой были подсчитаны нормативная и расчетная трудоемкость. Единичные трудоемкости были взяты из сборников Единых норм и расценок (ЕНиР). Результаты расчетов объемов и трудоемкости приведены в табл. 2, 3.

Помимо объемов и трудоемкостей основных элементов каркаса, представленных в табл. 2, в расчете производственных затрат были учтены лестничные пролеты, узловые соединения элементов и подача бетонной смеси к месту укладки.

Оценка эффективности сборно-монолитных каркасных систем осуществляется в три этапа.

1. Определение производственных затрат и выбор наиболее выгодного варианта по этому критерию.

Расчет каждого варианта по критерию производственных затрат будет производиться по формуле (1). Целевая функция: суммарные производственные затраты на машины и механизмы, заработную плату сотрудников стремятся к минимуму.

$$Z_1 = \sum_{j=1}^m T_{ij}^M C_j^M + \sum_{x=1}^a \Pi_{ix}^C C_x^C \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\Pi_{ix}^C = \sum_{y=1}^b T_{xy}^C N_{xy}^C, \quad (2)$$

где T_{ij}^M — трудоемкость основной или вспомогательной машины j -й категории для i -го варианта, маш.-ч; C_j^M — стоимость одного часа работы основной или вспомогательной машины j -й категории, руб./ч; $\sum_{j=1}^m T_{ij}^M C_j^M$ — суммарные затраты на оплату задействованных машин и механизмов всех категорий для i -го варианта, руб.; Π_{ix}^C — трудоемкость всех работников строительной площадки разряда x в i -м варианте, чел.-ч (формула (2)); C_x^C — стоимость одного часа работы работника строительной площадки разряда x , руб./ч; T_{xy}^C — трудоемкость работника строительной площадки разряда x для выполнения работы y в i -м варианте, чел.-ч; N_{xy}^C — количество работников строительной площадки разряда x для выполнения работы y в i -м варианте, ед.; $\sum_{y=1}^b T_{xy}^C N_{xy}^C$ — суммарная трудоемкость всех работников строительной площадки разряда x для выполнения всех работ в i -м варианте, чел.-ч.

Для расчета производственных затрат в качестве основных машин были приняты кран башенный КБ-515-01 грузоподъемностью 10 т и автобетононасос ТЗА АБН-47 с максимальной подачей на выходе 90,12 м³/ч. Стоимость одного машино-часа определялась по ФСЭМ 81-01-2001 и индексировалась по «Сборнику индексов пересчета

Табл. 2. Объемы работ и нормативная трудоемкость для рассматриваемых вариантов на 1000 м³ здания

Table 2. The scope of work and standard labour intensity for the options under consideration per 1,000 m³ of a building

Номер No.	Наименование Name	Материал Material	Единицы измерения Units of measurement	Вариант конструкции Structure option					
				Колонны Columns			Ригели Crossbars		
				Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity		Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity	
					чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours		чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours
1	«РЕКОН» с несъемной плитой опалубкой RECON with leave-in-place formwork	Бетон Concrete	шт. / items	29,00	69,60	6,96	48,00	67,20	13,44
			м ³ / m ³	2,55	2,09	—	4,89	4,35	—
		Арматура Rebar	т/шт. / t/items	—	—	—	0,19	3,59	—
2	«РЕКОН» со сборным перекрытием RECON with precast floor slab	Бетон Concrete	шт. / items	29,00	69,60	6,96	48,00	67,20	13,44
			м ³ / m ³	—	—	—	4,89	4,35	—
		Арматура Rebar	т / t	2,55	2,09	—	0,19	3,59	—
3	«АРКОС» со сборной колонной ARCOS with precast column	Бетон Concrete	шт. / items	29,00	69,60	6,96	—	—	—
			м ³ / m ³	2,55	2,09	—	14,65	13,04	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	2,81	39,38	—
		Опалубка Formwork	м ² / m ²	—	—	—	82,37	23,07	—
4	«АРКОС» с крайними сборными и межстенными монолитными колоннами ARCOS with precast external and monolithic intramural columns	Бетон Concrete	шт. / items	15,00	36,00	3,60	—	—	—
			м ³ / m ³	6,63	7,29	—	14,65	13,04	—
		Арматура Rebar	т / t	0,46	4,01	—	2,81	39,38	—
		Опалубка Formwork	м ² / m ²	66,25	26,50	—	82,37	23,07	—
5	«АРКОС» с монолитными колоннами ARCOS with monolithic columns	Бетон Concrete	шт. / items	—	—	—	—	—	—
			м ³ / m ³	13,91	15,30	—	14,65	13,04	—
		Арматура Rebar	т / t	0,97	8,45	—	2,81	39,38	—
		Опалубка Formwork	м ² / m ²	139,13	55,65	—	82,37	23,07	—
6	Безригельная технология Crossbar-free technology	Бетон Concrete	шт. / items	—	—	—	—	—	—
			м ³ / m ³	13,91	15,30	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	0,97	8,45	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м ² / m ²	139,13	55,65	—	—	—	—

Окончание Табл. 2 / End of the Table 2

Номер No.	Наименование Name	Материал Material	Единицы измерения Units of measurement	Вариант конструкции Structure option					
				Колонны Columns			Ригели Crossbars		
				Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity		Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity	
					чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours		чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours
7	Монолитный каркас Monolithic frame	Бетон Concrete	шт. / items			—	—	—	—
			м³ / m³	13,91	15,30	—	14,65	13,04	—
		Арматура Rebar	т / t	0,97	8,45	—	2,81	39,38	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	139,13	55,65	—	82,37	23,07	—
8	Монолитный каркас безригельный Monolithic crossbar-free frame	Бетон Concrete	шт. / items	—	—	—	—	—	—
			м³ / m³	13,91	15,30	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	0,97	8,45	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	139,13	55,65	—	—	—	—

Табл. 3. Объемы работ и нормативная трудоемкость для рассматриваемых вариантов на 1000 м³ здания

Table 3. The scope of work and standard labour intensity for the options under consideration per 1,000 m³ of a building

Номер No.	Наименование Name	Материал Material	Единицы измерения Units of measure	Вариант конструкции Design variant					
				Перекрытие Overlapping			Стены Walls		
				Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity		Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity	
					чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours		чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours
1	«РЕКОН» с несъемной плитой опалубкой RECON with leave-in-place formwork	Бетон Concrete	шт. / items	40,00	44,00	11,20	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	44,85	25,57	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / шт. t / items	47,00	11,28	—	—	—	—
2	«РЕКОН» со сборным перекрытием RECON with precast floor slab	Бетон Concrete	шт. / items	20,00	22,00	5,60	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	—	—	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	—	—	—
3	«АРКОС» со сборной колонной ARCOS with precast column	Бетон Concrete	шт. / items	20,00	22,00	5,60	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	—	—	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	—	—	—	—	—	—

Окончание Табл. 3 / End of the Table 3

Номер No.	Наименование Name	Материал Material	Единицы измерения Units of measure	Вариант конструкции Design variant					
				Перекрытие Overlapping			Стены Walls		
				Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity		Объем Volume	Трудоемкость Labor intensity	
					чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours		чел.-ч man- hours	маш.-ч machine hours
4	«АРКОС» с крайними сборными и межстенными монолитными колоннами ARCOS with precast external and monolithic intramural columns	Бетон Concrete	шт. / items	20,00	22,00	5,60	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	—	—	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	—	—	—	—	—	—
5	«АРКОС» с монолитными колоннами ARCOS with monolithic columns	Бетон Concrete	шт. / items	20,00	22,00	5,60	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	—	—	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	—	—	—	—	—	—
6	Безригельная технология Crossbar-free technology	Бетон Concrete	шт. / items	20,00	22,00	5,60	—	—	—
			м³ / m³	—	—	—	103,30	81,61	—
		Арматура Rebar	т / t	—	—	—	3,98	59,63	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	—	—	—	731,03	182,76	—
7	Монолитный каркас Monolithic frame	Бетон Concrete	шт. / items	—	—	—	136,00	173,00	43,80
			м³ / m³	70,48	40,17	—	—	—	—
		Арматура Rebar	т / t	7,91	118,59	—	—	—	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	331,26	72,88	—	—	—	—
8	Монолитный каркас безригельный Monolithic crossbar-free frame	Бетон Concrete	шт. / items	—	—	—	—	—	—
			м³ / m³	70,48	40,17	—	103,30	81,61	—
		Арматура Rebar	т / t	7,91	118,59	—	3,98	59,63	—
		Опалубка Formwork	м² / m²	331,26	72,88	—	731,03	182,76	—

сметной стоимости строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов Санкт-Петербурга на июль 2020 года».

2. Определение выбросов углекислого газа CO₂ для каждого из вариантов.

Для расчета снижения выбросов углекислого газа принято, что при возведении жилого здания из сборных железобетонных конструкций среднее снижение выбросов углекислого газа на 1 м³ бетона составляет 11 % (38 кг CO₂ эк./м³) [6, 20, 21].

3. Определение сроков строительства по каждому из выбранных вариантов с помощью ПК Mi-

crosoft Project. Все работы ведутся поточно по двум захваткам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенного расчета были получены следующие результаты, которые представлены в табл. 4–6 и на рис. 4–9.

1. Каркас «РЕКОН» имеет самый высокий показатель и по производственным затратам (523,51 тыс. руб.), и по суммарной трудоемкости машин (80,967 маш.-ч). Это связано с тем, что элементы данного каркаса имеют сборную и моно-

Табл. 4. Результаты расчетов производственных затрат, трудоемкости и снижения выбросов CO₂ на 1000 м³ зданияTable 4. Calculated production costs, labour intensity, and CO₂ reduction per 1,000 m³ of a building

Номер No.	Наименование Name	Производствен- ные затраты, тыс. руб. Production costs, thousand rubles	Суммарная трудоемкость, чел.-ч Total labour intensity, man- hours	Трудоемкость крана, маш.-ч Crane labor intensity, machine hours	Трудоемкость автобетононасоса, маш.-ч Labour intensity of concrete pump, machine hours	Снижение CO ₂ , % CO ₂ reduction, %
1	«РЕКОН» с несъемной плитой опалубкой RECON with leave-in- place formwork	523,51	1481,98	73,908	7,059	8,15
2	«РЕКОН» со сборным перекрытием RECON with precast floor slab	464,03	1681,09	72,173	0	10,73
3	«АРКОС» со сборной колонной ARCOS with precast column	410,59	1487,46	58,732	2,322	10,19
4	«АРКОС» с крайними сборными и межстенными монолитными колоннами ARCOS with precast external and monolithic intramural columns	395,26	1431,94	55,415	3,216	9,82
5	«АРКОС» с монолитными колоннами ARCOS with monolithic columns	378,41	1370,93	51,815	4,2	9,42
6	Безригельная технология Crossbar-free technology	383,60	1389,57	8,154	15,824	4,15
7	Монолитный каркас Monolithic frame	512,36	1856,00	43,964	13,37	5,49
8	Монолитный каркас безригельный Monolithic crossbar- free frame	495,84	1793,49	0,304	25,338	0

Табл. 5. Объем монолитного и сборного бетона на 1000 м³ зданияTable 5. Monolithic and precast concrete volume per 1,000 m³ of a building

Номер No.	Общий объем бетона, м ³ Total volume of concrete, m ³	Монолитный бетон Monolithic concrete		Сборный бетон Precast concrete	
		Объем, м ³ Volume, m ³	Проценты Per centum	Объем, м ³ Volume, m ³	Проценты Per centum
1	192,29	49,74	25,9	142,55	74,1
2	198,87	4,89	2,5	193,98	97,5
3	198,27	14,65	7,4	183,62	92,6
4	198,18	21,28	10,7	176,90	89,3
5	198,29	28,56	14,4	169,73	85,6
6	188,09	117,21	62,3	70,88	37,7
7	197,86	99,04	50,1	98,8	49,9
8	187,69	187,69	100,0	0	0

Табл. 6. Результаты расчетов сроков строительства на 1000 м³ здания и на типовой этаж

Table 6. Calculated construction time per 1,000 m³ of a building/a standard floor

Номер No.	Наименование Name	Сроки возведения, раб. дней Construction time, days	
		На 1000 м ³ здания Per 1,000 m ³ of a building	На типовой этаж Per standard floor
1	«РЕКОН» с несъемной плитой опалубкой RECON with leave-in-place formwork	7	24
2	«РЕКОН» со сборным перекрытием RECON with precast floor slab	6	21,5
3	«АРКОС» со сборной колонной ARCOS with precast column	7.5	27,5
4	«АРКОС» с крайними сборными и межстенными монолитными колоннами ARCOS with precast external and monolithic intramural columns	9	31,5
5	«АРКОС» с монолитными колоннами ARCOS with monolithic columns	12	43,5
6	Безригельная технология Crossbar-free technology	16	58,5
7	Монолитный каркас Monolithic frame	18	65,5
8	Монолитный каркас безригельный Monolithic crossbar-free frame	22	79,5

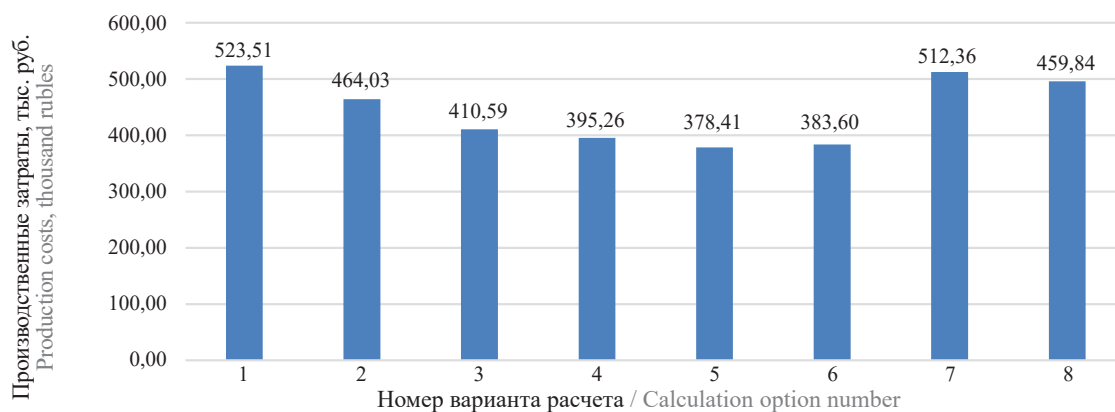


Рис. 4. Величина производственных затрат для варианта конструкции каркаса

Fig. 4. Production costs of a frame design option

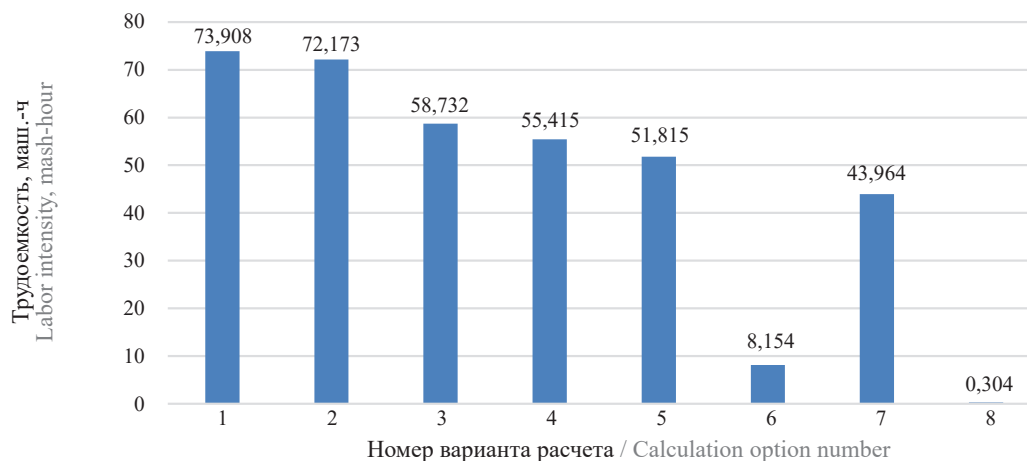


Рис. 5. Величина трудоемкости крана для варианта конструкции

Fig. 5. The labour intensity of a crane for a design option

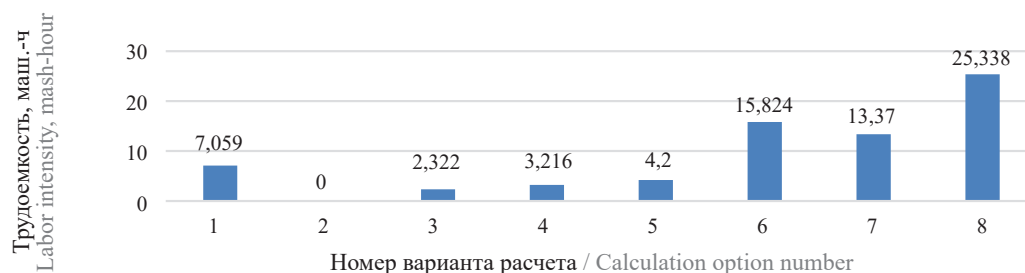


Рис. 6. Величина трудоемкости автобетононасоса для варианта конструкции

Fig. 6. The labour intensity of a concrete pump for a design option

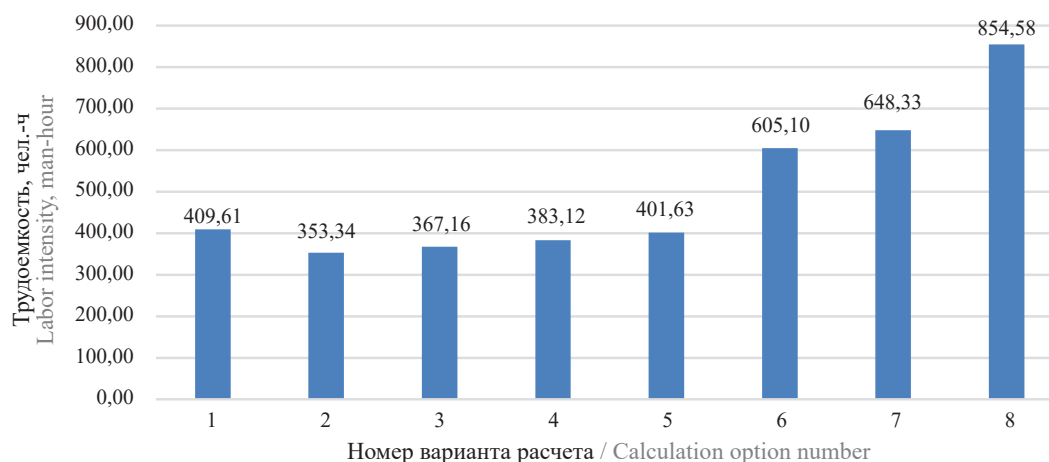


Рис. 7. Величина суммарной трудоемкости для варианта конструкции

Fig. 7. The total labour intensity of a design option

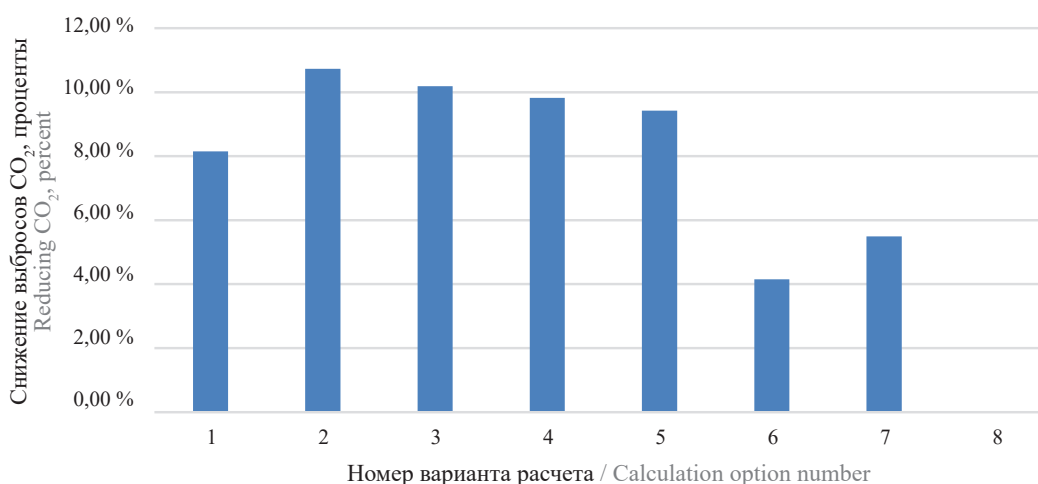


Рис. 8. Снижение выбросов CO₂ для варианта конструкции

Fig. 8. Reduced CO₂ emissions for design option

литную части (сборно-монолитный ригель, сборно-монолитное перекрытие). Трудоемкость машин повышается за счет того, что для сборно-монолитного элемента конструкции необходимо применять как кран, так и автобетононасос. Для устройства сборных элементов требуются более квалифицированные рабочие с большим количеством человек в бригаде, следовательно, повышаются затраты на оплату труда и растут производственные затраты.

2. Каркас «РЕКОН» со сборным перекрытием имеет меньшие затраты (464,03 тыс. руб.). Это связано с тем, что в этом варианте перекрытие полностью сборное, т.е. работы по устройству монолитной части перекрытия исключаются из производственных затрат. На показатель также влияет и то, что размеры стандартных многпустотных плит больше, чем размеры плит каркаса «РЕКОН», вследствие чего, чтобы перекрыть необходимую

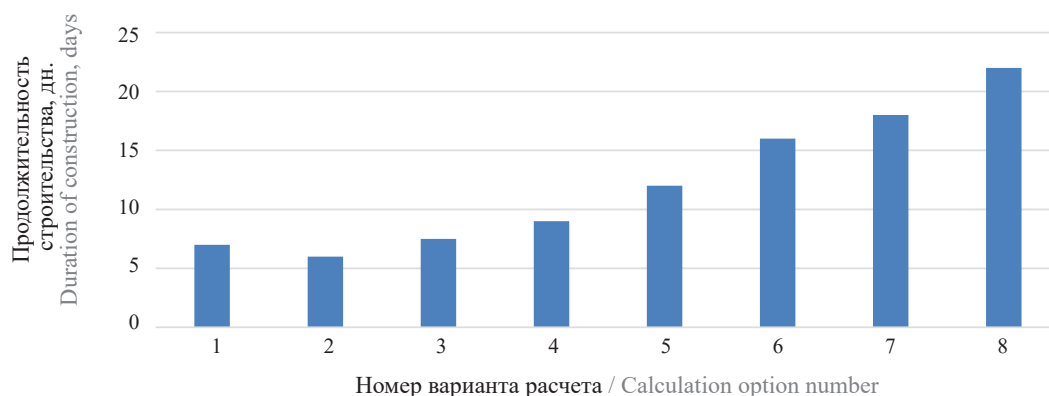


Рис. 9. Продолжительность строительства по каждому из вариантов на 1000 м³ здания

Fig. 9. Duration of construction for each of the options per 1,000 m³ of a building

площадь, многпустотных плит потребуется меньше. Бетон в узлы каркаса подается краном в бадьях, так как монолитный бетон используется только в узлах и стыках, поэтому затраты на автобетононасос исключаются из производственных затрат. Трудоемкость только крана составляет 72,173 маш.-ч.

3. Каркас «АРКОС» со сборными колоннами. Производственные затраты составляют 410,59 тыс. руб. Трудоемкость крана равна 58,732 маш.-ч, трудоемкость автобетононасоса — 2,322 маш.-ч. В каркасе данного типа применяются полностью монолитные ригели, что, по сравнению с другим исполнением ригелей, снижает затраты на оплату труда, так как задействованы рабочие с меньшей квалификацией, чем необходимо для устройства сборных ригелей. Также на критерий затрат влияет то, что ригели располагаются в одной плоскости с перекрытием, и необходимость устройства боковой опалубки отпадает.

4. Каркас «АРКОС» — внутренние колонны монолитные, наружные — сборные. Можно наглядно проследить, как изменяются затраты и трудоемкость машин при замене способа исполнения одного из элементов каркаса, в данном случае колонн. Производственные затраты — 395,26 тыс. руб., трудоемкость крана — 55,415 маш.-ч, трудоемкость автобетононасоса — 3,216 маш.-ч. За счет того, что часть колонн была выполнена из монолитного бетона, показатели затрат и трудоемкость крана снизились, а трудоемкость автобетононасоса выросла.

5. Каркас «АРКОС» с монолитными колоннами. Аналогично изменяются показатели в случае, если заменить все колонны на монолитные, затраты составляют 378,41 тыс. руб. (ниже на 8,4 % по сравнению со сборным вариантом номер 3), трудоемкость крана — 51,815 маш.-ч (ниже на 13,5 %), автобетононасоса — 4,2 маш.-ч (выше на 79,6 %).

6. Безригельная технология. Заменяя крупноборные стены монолитными и полностью исключив из каркаса ригели, можно получить экономию, однако это значительно увеличит сроки строительства. В данном варианте затраты снижаются как за счет

уменьшения количества элементов каркаса, так и за счет снижения квалификации рабочих, необходимых для выполнения монолитных работ. Производственные затраты составляют 383,6 тыс. руб., трудоемкость крана — 8,154 маш.-ч, автобетононасоса — 15,824 маш.-ч.

7. Монолитный каркас с крупноборными стенами. Замена сборных элементов каркаса монолитными может дать существенную экономию в денежных средствах, однако при замене сборного перекрытия монолитным затраты значительно увеличиваются, так как это большой объем работ, при котором повышаются трудозатраты рабочих и машин, выполняющих монолитное перекрытие.

8. Монолитный каркас безригельный. Исключив из каркаса ригели и выбрав в качестве несущих элементов монолитные стены, не получается снизить производственные затраты. За счет того, что все элементы каркаса выполняются из монолитного бетона, потребность в кране практически отсутствует, следовательно, возрастает трудоемкость автобетононасоса (25,338 маш.-ч), стоимость часа работы которого в 2 раза превышает стоимость крана. Именно с этим связано то, что показатель производственных затрат увеличивается.

Для сравнения вариантов конструктивных схем зданий воспользуемся относительными показателями, которые сводим к одному средневзвешенному показателю, рассчитанному по формуле:

$$R_{\text{np}} = \frac{3R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + 2R_5 + 3R_6}{11} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где R_1 — относительный показатель производственных затрат, рассчитанный по формуле:

$$R_1 = \frac{3_1}{600}, \quad (4)$$

R_2 — относительный показатель суммарной трудоемкости, рассчитанный по формуле:

$$R_2 = \frac{T_i^{\text{ч}}}{900}, \quad (5)$$

R_3 — относительный показатель трудоемкости крана, рассчитанный по формуле:

$$R_3 = \frac{T_{\text{кран}}^{\text{М}}}{80}, \quad (6)$$

R_4 — относительный показатель трудоемкости автобетононасоса, рассчитанный по формуле:

$$R_4 = \frac{T_{\text{АБС}}^{\text{М}}}{30}, \quad (7)$$

R_5 — относительный показатель выбросов CO_2 , рассчитанный по формуле:

$$R_5 = 1 - \frac{V_i^{\text{CO}_2}}{12}, \quad (8)$$

R_6 — относительный показатель продолжительности строительства, рассчитанный по формуле:

$$R_6 = \frac{\Pi_i}{25}. \quad (9)$$

В результате получаем табл. 7 относительных параметров вариантов, где учитываем весовые относительных показателей.

Табл. 7. Относительные показатели и средневзвешенное значение

Table 7. Relative indicators and weighted average

Варианты Options	Показатели Indicators						
	$3R_1$	R_2	R_3	R_4	$2R_5$	R_6	$R_{\text{пр}}$
1	$0,87 \times 3$	0,46	0,92	0,24	$0,32 \times 2$	0,84	0,519
2	$0,77 \times 3$	0,39	0,9	0	$0,11 \times 2$	0,72	0,413
3	$0,68 \times 3$	0,41	0,73	0,08	$0,15 \times 2$	0,90	0,405
4	$0,66 \times 3$	0,43	0,69	0,11	$0,18 \times 2$	1,08	0,423
5	$0,63 \times 3$	0,45	0,65	0,14	$0,21 \times 2$	1,44	0,454
6	$0,64 \times 3$	0,67	0,1	0,53	$0,65 \times 2$	1,92	0,585
7	$0,85 \times 3$	0,72	0,55	0,45	$0,54 \times 2$	2,16	0,683
8	$0,83 \times 3$	0,95	0,04	0,85	$1,00 \times 2$	2,64	0,815

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наименьшее значение приведенного показателя имеет конструктивный вариант каркаса «АРКОС» с полностью сборными колоннами. Показатели производственных затрат, трудоемкости крана и автобетононасоса которого составляют 378,41 тыс. руб.,

51,815 маш.-ч, 4,2 маш.-ч соответственно при снижении выбросов газов 9,48 %. Продолжительность возведения каркаса данного типа на 1000 м³ здания составляет 7,5 дней. Однако значение приведенного показателя каркаса «РЕКОН» со сборным перекрытием не на много отличается от выбранного варианта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чиорино М.А., Фаликман В.Р. Долговечность и устойчивое развитие конструкционного бетона в поле зрения мирового научного сообщества // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 24–26.
2. Гусев Б.В., Фаликман В.Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 30–36.
3. Hasanbeigi A., Price L., Lin E. Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. Issue 8. Pp. 6220–6238. DOI: 10.1016/j.rser.2012.07.019
4. Park J., Tae S., Kim T. Life cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. Issue 5. Pp. 2940–2946. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.014
5. Kirilovs E., Gusovius H. J., Dolacis J., Kukle S. Innovative fibreboard from wet-preserved hemp // Research for Rural Development. 2013. Pp. 200–206.
6. Dong Y.H., Jaillon L., Chu P., Poon C.S. Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods — A case study of high-rise private building // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 99. Pp. 39–53. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.145
7. Lim C., Lee S., Kim S. Embodied energy and CO₂ emission reduction of a column-beam structure with enhanced composite precast concrete members // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2015. Vol. 14. Issue 3. Pp. 593–600. DOI: 10.1310/jaabe.14.593

8. Pillai R.G., Gettu R., Santhanam M., Rengaraju S., Dhandapani Y., Rathnarajan S. et al. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3) // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 118. Pp. 111–119. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.11.019

9. Charlson A. Recycling and reuse of waste in the construction industry // *Structural Engineer*. 2008. Vol. 86. Pp. 32–37.

10. Hong W.K., Jeong S.Y., Park S.C., Kim J.T. Experimental investigation of an energy-efficient hybrid composite beam during the construction phase // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 46. Pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.10.048

11. Balasbaneh A.T., Bin Marsono A.K., Gohari A. Sustainable materials selection based on flood damage assessment for a building using LCA and LCC // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 222. Pp. 844–855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.005

12. Won I., Na Y., Kim J.T., Kim S. Energy-efficient algorithms of the steam curing for the in situ production of precast concrete members // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 64. Pp. 275–284. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.05.019

13. Зомеева Е.Э., Фомин Н.И. Новые технологические и конструктивные решения для реализации инновационного потенциала сборно-монолитных систем гражданских зданий // *Стройкомплекс Среднего Урала*. 2017. № 6 (209). С. 31–32.

14. Стрелец К.И., Стрелкова М.Д. Эффективность применения сборно-монолитных каркасных систем в гражданском строительстве // *Неделя науки СПбПУ: мат. науч. конф. с междунар. участием, лучшие доклады*. 2019. С. 196–198.

15. Wu P., Low S.P. Lean management and low carbon emissions in precast concrete factories in Singapore // *Journal of Architectural Engineering*. 2012.

Vol. 18. Issue 2. Pp. 176–186. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000053

16. Войцешук М.В., Бурманова А.В., Балакчина О.Л. Достоинства и недостатки, предопределяющие целесообразность применения современных сборно-монолитных домостроительных систем // *Инновационное развитие строительства и архитектуры*. 2019. С. 112–116.

17. Nematollahi B., Voo Y.L., Saifulnaz M.R.R. Structural behavior of precast Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) cantilever retaining walls: Part I — Analysis and design procedures and Environmental Impact Calculations (EIC) // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 18. Issue 5. Pp. 1470–1480. DOI: 10.1007/s12205-014-0411-8

18. Зомеева Е.Э. Комплексная оценка и совершенствование конструктивных и технологических решений гражданских монолитных и сборно-монолитных зданий: магистерская диссертация. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2018.

19. Lim C.Y., Lee S.H., Lee G.J., Kim S.K. Analysis of the carbon dioxide emission used in the transportation of precast concrete members // *The Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 2011. Vol. 46. Pp. 37–47. DOI: 10.4203/ccp.96.36

20. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // *Строительство: наука и образование*. 2021. Т. 11. № 2. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2.

21. Рыбакова А.О. Анализ особенностей проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности // *Строительство: наука и образование*. 2020. Т. 11. № 2. С. 5. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.5

Поступила в редакцию 26 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 10 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 13 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Мария Дмитриевна Стрелкова — студентка магистратуры; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 1043330; strelkova.marya2015@gmail.com;

Ксения Игоревна Стрелец — кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 617762; kstrelets@mail.ru;

Виктор Захарович Величкин — доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 549927; v.velichkin2011@yandex.ru;

Марина Вячеславовна Петроченко — кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 589472; petrochenko_mv@spbstu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chiorino M.A., Falikman V.R. Durability and sustainable development of structural concrete in the field of vision of the global scientific community. *Industrial and Civil Construction*. 2016; 1:24-26. (rus.).
2. Gusev B.V., Falikman V.R. Concrete and reinforced concrete in the era of sustainable development. *Industrial and Civil Construction*. 2016; 2:30-36. (rus.).
3. Hasanbeigi A., Price L., Lin E. Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(8):6220-6238. DOI: 10.1016/j.rser.2012.07.019
4. Park J., Tae S., Kim T. Life cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(5):2940-2946. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.014
5. Kirilovs E., Gusovius H. J., Dolacis J., Kukle S. Innovative fibreboard from wet-preserved hemp. *Research for Rural Development*. 2013; 200-206.
6. Dong Y.H., Jaillon L., Chu P., Poon C.S. Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods — A case study of high-rise private building. *Construction and Building Materials*. 2015; 99:39-53. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.145
7. Lim C., Lee S., Kim S. Embodied Energy and CO₂ Emission Reduction of a Column-Beam Structure with Enhanced Composite Precast Concrete Members. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2015; 14(3):593-600. DOI: 10.3130/jaabe.14.593
8. Pillai R.G., Gettu R., Santhanam M., Rengaraju S., Dhandapani Y., Rathnarajan S. et al. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*. 2019; 118:111-119. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.11.019
9. Charlson A. Recycling and Reuse of Waste in the Construction Industry. *Structural Engineer*. 2008; 86:32-37.
10. Hong W.K., Jeong S.Y., Park S.C., Kim J.T. Experimental Investigation of an Energy-Efficient Hybrid Composite Beam during the Construction Phase. *Energy and Buildings*. 2012; 46:37-47. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.10.048
11. Balasbanch A.T., Bin Marsono A.K., Gohari A. Sustainable Materials Selection Based on Flood Damage Assessment for a Building Using LCA and LCC. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 222:844-855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.005
12. Won I., Na Y., Kim J.T., Kim S. Energy-Efficient Algorithms of the Steam Curing for the in Situ Production of Precast Concrete Members. *Energy and Buildings*. 2013; 64:275-284. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.05.019
13. Zoteeva E.E., Fomin N.I. New technological and design solutions for the implementation of the innovative potential of precast-monolithic systems of civil buildings. *Building complex of the Middle Urals*. 2017; 6(209):31-32. (rus.).
14. Strelkova M.D., Strelets K.I. The effectiveness of the use of prefabricated monolithic frame systems in civil engineering. *SPbPU Science Week: materials of a scientific conference with international participation, best reports*. 2019; 4:196-198. (rus.).
15. Wu P., Low S.P. Lean Management and Low Carbon Emissions in Precast Concrete Factories in Singapore. *Journal of Architectural Engineering*. 2012; 18(2):176-186. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000053
16. Wojcieszczuk M.V., Byrmanova A.V., Balachina O.L. Advantages and disadvantages that predetermine the feasibility of using modern prefabricated monolithic house-building systems. *Innovative Development of Construction and Architecture*. 2019; 6:112-116. (rus.).
17. Nematollahi B., Voo Y.L., Saifulnaz M.R.R. Structural behavior of precast Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) cantilever retaining walls: Part I — Analysis and design procedures and Environmental Impact Calculations (EIC). *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014; 18(5):1470-1480. DOI: 10.1007/s12205-014-0411-8
18. Zoteeva E.E. *Comprehensive assessment and improvement of structural and technological solutions for civil monolithic and precast-monolithic buildings: thesis of candidate of technical sciences*. Ekaterinburg, 2018; 118. (rus.).
19. Lim C.Y., Lee S.H., Lee G.J., Kim S.K. Analysis of the Carbon Dioxide Emission Used in the Transportation of Precast Concrete Members. *The Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 2011; 46:37-47. DOI: 10.4203/ccp.96.36
20. Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Aleksandrova O.V. Geopolymer concrete made using large-tonnage technogenic waste. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):2. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2 (rus.).
21. Rybakova A.O. Analysis of design features based on the application of modular elements of maximum readiness. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):5. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.5

Received June 26, 2021.

Adopted in revised form on November 10, 2021.

Approved for publication on November 13, 2021.

B I O N O T E S: **Mariia D. Strelkova** — graduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 1043330; strelkova.marya2015@gmail.com;

Ksenia I. Strelets — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 617762; kstrelets@mail.ru;

Victor Z. Velichkin — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 549927; v.velichkin2011@yandex.ru;

Marina V. Petrochenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 589472; petrochenko_mv@spbstu.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Структура и состав реинжиниринга застройки

Сергей Борисович Сборщиков, Павел Анатольевич Журавлев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Вследствие воздействия научно-технического прогресса, изменения запросов потребителей, производственных возможностей строительной индустрии происходит устаревание инженерных решений объектов строительства. Преодоление противоречий между запросами потребителей и характеристиками объектов строительной продукции осуществляется путем обновления, модернизации, переоснащения и соответствующей трансформации проектных решений.

Материалы и методы. Предметом исследования являются формирующие структуру городской застройки (пространственной организации) объекты капитального строительства (ОКС) различного функционального назначения, градостроительные решения которых в процессе эксплуатации требуют реализации мероприятий реинжиниринга. Рассмотрен перечень ОКС, включающий объекты производственного назначения (промышленные, сельскохозяйственные связи), непроизводственного назначения (общественные, жилищный фонд) и линейные объекты (путепроводы, трубопроводы, электрические сети). Отмечено, что в зависимости от функциональных, планировочных, конструктивных, организационно-технологических особенностей ОКС, а также специфики протекающих в них процессов жизнедеятельности или производственно-технологических процессов, состав и структура реинжиниринга имеют характерные отличия. Метод исследования — структурный и функциональный анализ.

Результаты. Описан состав мероприятий и способы реализации реинжиниринга жилой и производственной застройки, зон инженерной и транспортной инфраструктуры. Учитывая особенности и специфику объектов, формирующих структуру городской застройки, представлены изменения по итогу мероприятий реинжиниринга.

Выводы. Констатируется, что структура и состав реинжиниринга застройки обладают существенной вариативностью, которая определяется ее типом, способом трансформации. Приведенная зависимость оказывает влияние на сочетание мероприятий реинжиниринга, в составе которых можно выделить мероприятия, определяющие характер трансформации застройки и дополняющие основное преобразование. Результаты исследования позволяют сформировать организационные схемы реинжиниринга застройки и определить характер их ресурсообеспечения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реинжиниринг застройки, реинжиниринг жилой и производственной застройки, зон инженерной и транспортной инфраструктуры, структура и состав реинжиниринга, пространственное развитие, реинжиниринг градостроительных решений, ресурсообеспечение инвестиционно-строительной деятельности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Структура и состав реинжиниринга застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1508–1519. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1508-1519

Ответственный за переписку: Сергей Борисович Сборщиков, sbs@mgsu.ru.

The reengineering of built-up areas: structure and composition

Sergej B. Sborshchikov, Pavel A. Zhuravlev

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

ABSTRACT

Introduction. Engineering solutions of construction facilities are becoming obsolete due to the impact of scientific and technological progress, changes in consumer needs and production capabilities of the construction industry. A gap between consumer needs and characteristics of construction products is bridged by updating, modernizing, retrofitting and transforming design solutions.

Materials and methods. The subject of the study is capital construction facilities that have various functional purposes: they structure built-up urban areas (space planning), whose urban planning solutions need reengineering in the course of operation. The article considers the list of capital construction entities that include industrial facilities (manufacturing, agricultural, and communication facilities), non-industrial facilities (public buildings, residential housing) and linear objects (overpasses, pipelines, power grids). Functional, planning, structural, organizational and technological features of capital construction facilities, features of vital processes, production and technological procedures, that are underway inside them, determine the characteristic differences in the composition and structure of construction reengineering. Structural and functional analysis is the research method of the study.

Results. The composition of actions and methods used to reengineer residential and industrial buildings, areas occupied by the engineering and transport infrastructure is described. The article presents changes introduced by reengineering actions with regard for the features of facilities that structure urban development. The co-authors acknowledge that the structure

and composition of construction reengineering are highly variable, and their variability is determined by the types of built-up areas and their transformation methods. This dependence impacts a combination of reengineering actions, including those that determine the nature of transformation and supplement the principal change. The research results allow to develop reengineering process organization charts and outline the resource provision process.

KEYWORDS: reengineering of buildings, reengineering of residential and industrial buildings, areas of engineering and transport infrastructure, reengineering structure and composition, spatial development, reengineering of urban planning solutions, provision of resources needed for investment and construction activities

FOR CITATION: Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. The reengineering of built-up areas: structure and composition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1508-1519. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1508-1519

Corresponding author: Sergej B. Sborshchikov, sbs@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современное общественное производство полностью базируется на разработке и реализации технических (инженерных) решений, с которыми также связано и последующее использование общественного продукта. Под влиянием научно-технического прогресса и изменения запросов потребителей инженерные решения устаревают, а сами продукты подвергаются износу [1–5]. Данные утверждения в полной мере соответствуют и инвестиционно-строительной сфере, и строительной продукции, которые, помимо указанных явлений, испытывают воздействие конвергенции (социальной, территориальной) [6]. Для преодоления противоречий между запросами потребителей и возможностями (характеристиками) строительной продукции необходимо ее обновление, модернизация и соответствующая трансформация заложенных в нее проектных решений [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривая застройку как совокупность объектов капитального строительства (ОКС), объединенных на основе общего градостроительного решения, а реинжиниринг как качественное его преобразование [8], необходимо провести группировку предмета исследования [9, 10]. Нормативно принято выделять три группы ОКС (рис. 1):

- 1) непроизводственного назначения;
- 2) производственного назначения;
- 3) линейные.

В основе подобной классификации в первую очередь лежит критерий функционального назначения, также учитываются связанные с ним особенности технологического и архитектурно-строительного проектирования, возведения и эксплуатации здания, сооружения. Подобным образом можно декомпозировать приведенные выше группы и дальше.

Объекты капитального строительства непроизводственного назначения укрупненно представляется возможным разделить на здания жилищного и нежилого фонда. Если первый вид связан с проживанием людей, то второй предназначен для пребывания и достижения целей общественного развития (административных, социальных, образовательных и культурных). По сложившейся традиции второй

тип принято разбивать на здания социально-культурного, коммунально-бытового и административного назначения. Данная декомпозиция объектов непроизводственного назначения может иметь продолжение, например, по форме собственности — частный, государственный и муниципальный жилищный и нежилой фонды, или исходя из целей использования — коммерческий, индивидуальный, специализированный и социальный жилищный фонд и т.д.

Объекты, которые функционируют в сферах материального производства, сельского хозяйства и связи, относятся к группе производственного назначения с соответствующей функциональной разбивкой. К указанной группе нередко причисляют и линейные объекты, однако в основных документах, регламентирующих инвестиционно-строительную деятельность, их выделяют в отдельную группу.

В проведенном исследовании автор ввиду явных отличительных признаков также считает целесообразным выделить в отдельную группу линейные объекты и разбить их на три подгруппы: путепроводы (автомобильные, железнодорожные и т.д.), трубопроводы и электрические сети. Подобная классификация линейных объектов выполнена в соответствии с п. 10.1 ст. 1 Градостроительного кодекса РФ и наличия у них таких отличительных признаков, как:

- значительное превышение длины над шириной;
- являются сооружениями;
- нерушимая связь с земельным участком;
- могут включать технологически связанные с ними площадные сооружения.

Территориально и функционально (или технологически) взаимосвязанные совокупности ОКС в рамках приведенных классификаций:

- 1) здания и сооружения производственного и непроизводственного назначения формируют застройку поселений;
- 2) линейные объекты составляют зоны соответствующей инфраструктуры.

При этом следует отметить, что здания непроизводственного назначения в границах поселений образуют жилую застройку, которая включает селитебные, рекреационные и иные зоны. Здания и сооружения производственного назначения в сво-

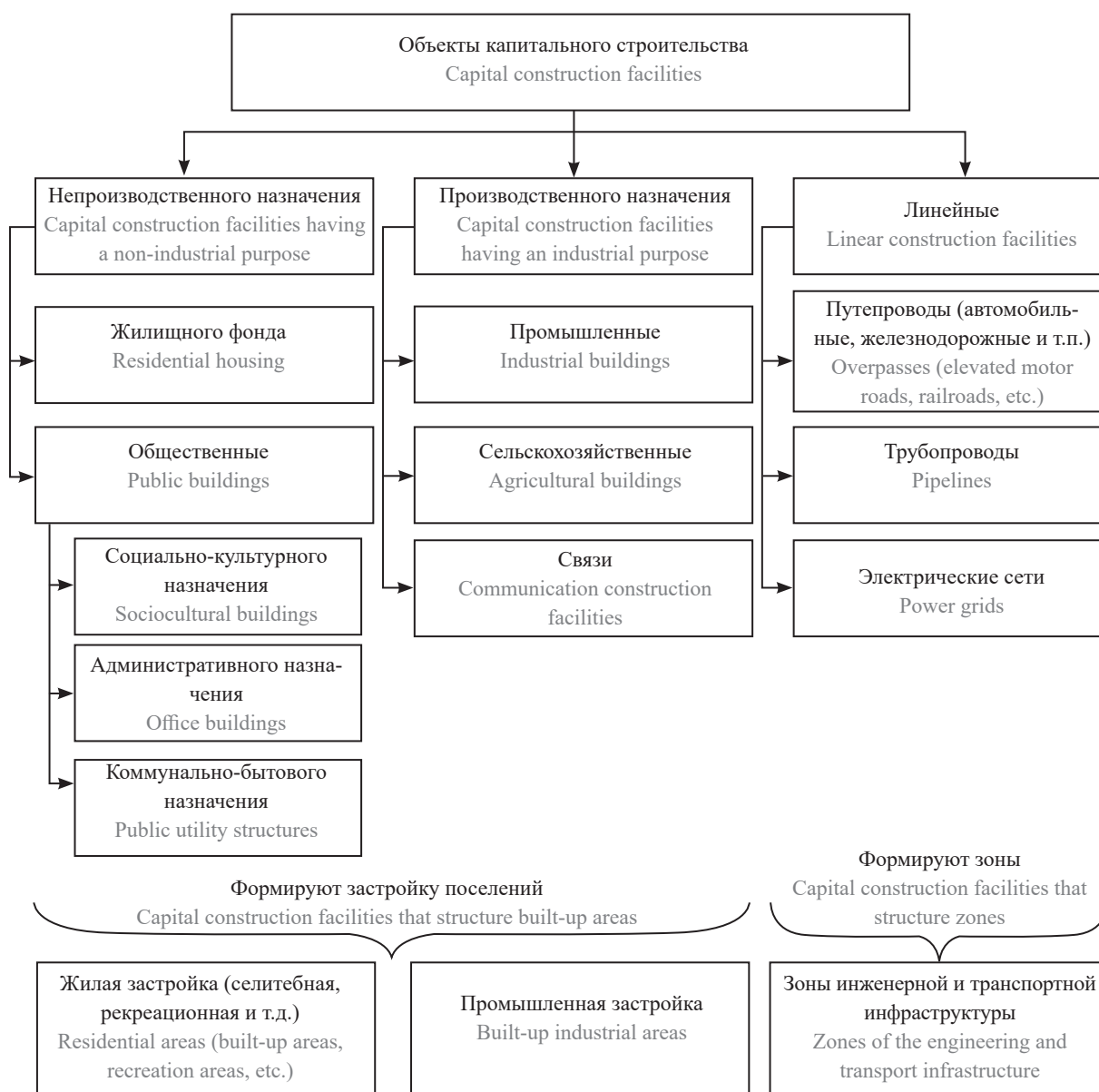


Рис. 1. Классификация объектов капитального строительства

Fig. 1. Classification of capital construction facilities

ей совокупности составляют промышленную застройку. Линейные объекты и формируемые ими зоны инженерной и транспортной инфраструктуры могут быть отдельными сооружениями (например, федеральные автомагистрали, железные дороги, газопроводы, нефтепроводы и т.д.), а могут быть частью застройки (городские сети, производственные коммуникации).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Функциональные, планировочные, конструктивные, организационно-технологические особенности выделенных групп ОКС, а также специфика протекающих в них процессов жизнедеятельности или производственно-технологических процессов обуславливают отличия в составе и структуре реинжиниринга.

Реинжиниринг жилой застройки, как качественное преобразование соответствующих технических решений, связан с реализацией комплекса мероприятий в границах определенной территории поселения (рис. 2), а именно [11–13]:

- реконструкции;
- реновации;
- перепрофилирования;
- нового строительства.

Жилая застройка, которую составляют объекты, связанные с жизнедеятельностью (жилые, общественные здания, сооружения городской инженерной и транспортной инфраструктуры), попадают в сферу взаимодействия местных (муниципальных) органов власти, застройщиков, а также собственников ОКС и являются предметом их управления или воздействия. Состав и структура реинжиниринга

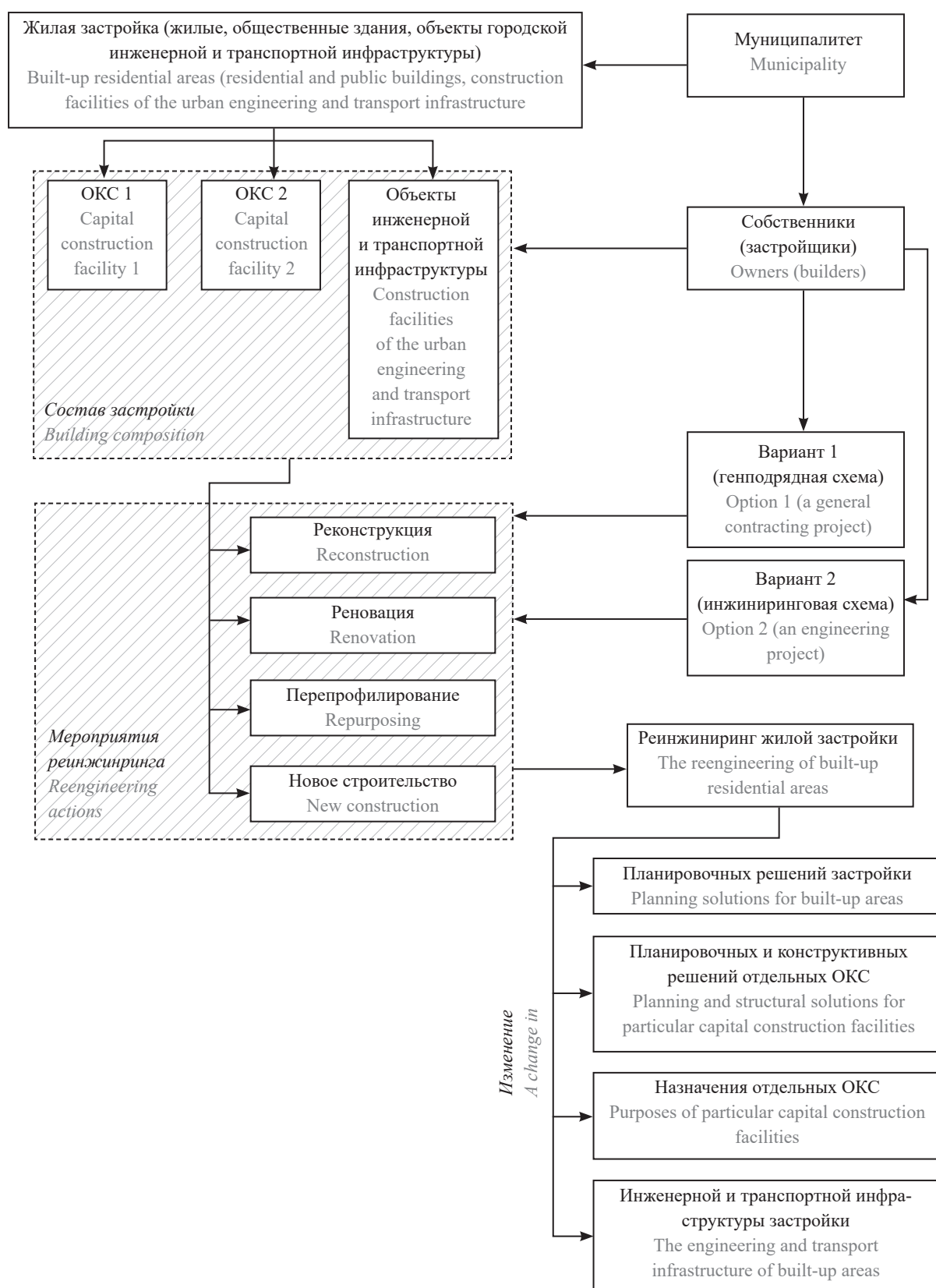


Рис. 2. Состав и структура реинжиниринга жилой застройки

Fig. 2. The reengineering of built-up residential areas: composition and structure

жилой застройки устанавливаются муниципалитетом на основе генерального плана развития поселения. В свою очередь, детализация этого развития

осуществляется застройщиками или собственниками относительно территорий или ОКС как их реинжиниринг.

Мероприятия реинжиниринга могут быть реализованы по двум вариантам. Вариант 1 предполагает использование генподрядной схемы управления производством работ, вариант 2 — инжиниринговой. Подобная вариативность определяет некоторое многообразие организационных схем реинжиниринга и их ресурсобеспечения [14–16], которые станут предметом дальнейших исследований по выбранной проблематике.

Реинжиниринг жилой застройки как комплексный процесс, предполагающий реализацию различных мероприятий и их сочетание, а также воздействия как на всю взаимосвязанную совокупность ОКС, так и на отдельные ее компоненты (отдельные здания, сооружения или их части), будет иметь своим результатом изменения, которые затрагивают все аспекты пространственной организации жилой застройки. К таким трансформациям можно причислить качественные преобразования:

- 1) планировочных решений застройки;
- 2) планировочных и конструктивных решений отдельных ОКС;
- 3) назначения отдельных ОКС;
- 4) решений инженерной и транспортной инфраструктуры застройки.

Включение таких мероприятий, как реновация и новое строительство, необходимо рассматривать только в контексте реинжиниринга всей жилой застройки, а не применительно к отдельным ОКС.

Реинжиниринг производственной застройки имеет свою специфику, которую обуславливают:

- состав застройки;
- организационные схемы реализации;
- перечень мероприятий и их сочетание;
- результат.

Структура и состав реинжиниринга производственной застройки приведены на рис. 3.

Характер и размеры производственной застройки определяются масштабом индустриального развития территории, которое, в свою очередь, предполагает зависимость от количества производств, их взаимосвязи или автономности, соблюдения санитарных и экологических требований (например, наличие санитарных защитных зон) и т.д.

Производственная застройка включает следующие объекты:

- основного производства;
- вспомогательного производства;
- подсобного назначения;
- административно-бытового назначения;
- производственной транспортной и инженерной инфраструктуры.

Намерение относительно реинжиниринга указанных объектов может быть принято собственником и направлено на изменение существующих решений:

- технологической части;
- строительной части.

Как правило, изменение технологии производства приводит к необходимости существенной трансформации планировочных, конструктивных решений строительной части, однако обратной зависимости может не наблюдаться, т.е. преобразования решений в строительной части могут не вызывать изменений в технологической, а только создавать более комфортные условия производства. В этой связи предполагается установить следующие мероприятия реинжиниринга производственной застройки [17–19]:

- реконструкция;
- реновация;
- техническое перевооружение;
- новое строительство;
- перепрофилирование.

Как и в предыдущем случае, где предметом исследования являлась жилая застройка, в данном варианте реновация и новое строительство рассматриваются только как мероприятия реинжиниринга всей совокупности строений производственного назначения. В то же время перепрофилирование может иметь два исхода. Первый — это перепрофилирование производства, а второй — изменение назначения, например, на социально-культурное или административное. Указанные направления перепрофилирования могут относиться как к отдельному зданию, так и ко всей производственной застройке.

Приведенная специфика реализации мероприятий реинжиниринга производственной застройки затем находит свое выражение в его результатах, которые могут иметь проекцию как на всю совокупность производственных зданий и сооружений, так и на отдельные ОКС. В качестве результатов реинжиниринга производственной застройки могут быть изменения:

- планировочных решений застройки;
- инженерной и транспортной инфраструктуры;
- производственно-технологических решений, которые в том числе могут привести к смене назначения всей застройки;
- планировочных и конструктивных решений отдельных ОКС;
- назначения отдельных ОКС.

Также стоит отметить, что вариативность организационных схем в данном виде по сравнению с реинжинирингом жилой застройки будет увеличена за счет возможного использования хозяйственного способа реализации мероприятий.

Зоны инженерной и транспортной инфраструктуры предполагают наличие в полосе отвода основных и вспомогательных объектов, решение о реинжиниринге которых принимает их собственник.

Организационной основой реинжиниринга может стать либо генподрядная, либо инжиниринговая схема управления строительством (рис. 4).

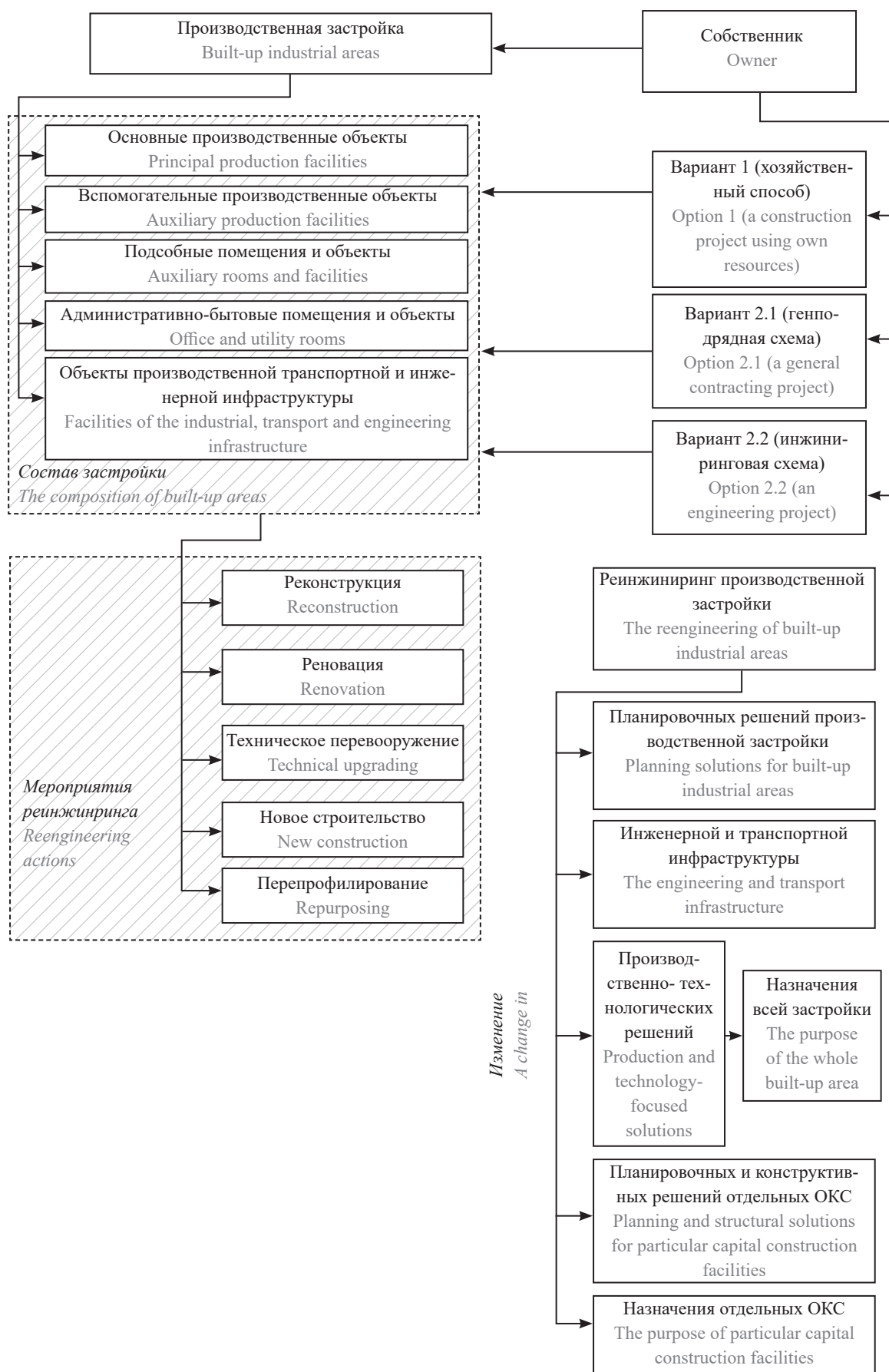


Рис. 3. Состав и структура реинжиниринга производственной застройки

Fig. 3. The reengineering of built-up industrial areas: composition and structure

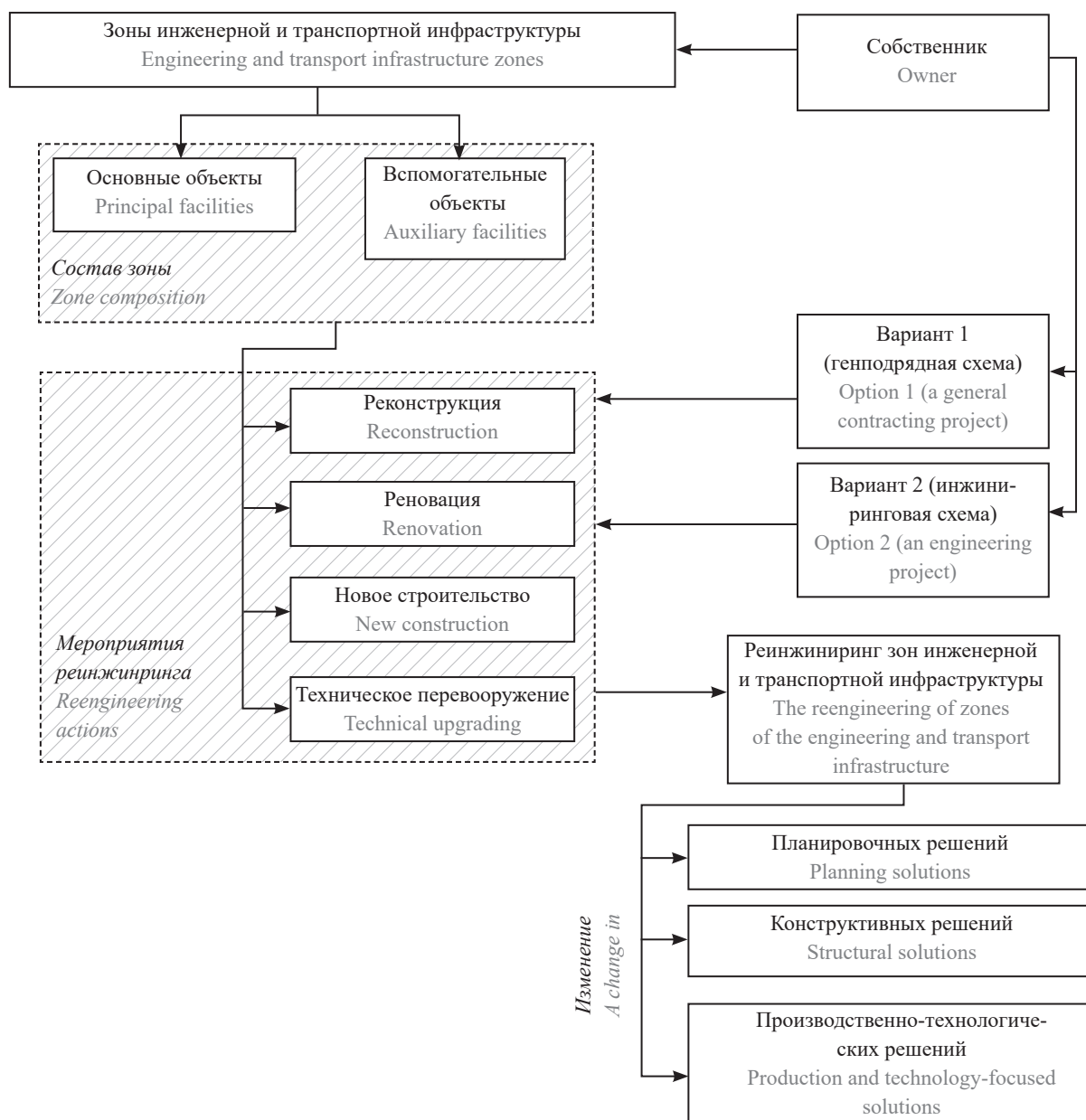


Рис. 4. Состав и структура реинжиниринга зон инженерной и транспортной инфраструктуры

Fig. 4. The reengineering of engineering and transport infrastructure zones: composition and structure

В состав реинжиниринга объектов инженерной и транспортной инфраструктуры будут входить мероприятия [20]:

- реконструкция;
- реновация;
- новое строительство;
- техническое перевооружение.

В данной группировке реновация и новое строительство так же, как и в двух предыдущих видах, рассматриваются только применительно ко всей совокупности сооружений и зданий.

Результующим эффектом реинжиниринга зон инженерной и транспортной инфраструктуры можно определить изменения:

- планировочных решений;
- конструктивных решений;

- производственно-технологических решений.

Таким образом, из приведенного выше можно заключить, что первые два вида изменений затрагивают строительную часть линейных объектов, а третья группа определяет преобразования и корректировки в технологической части. После реинжиниринга подобные объекты и их комплексы должны стать более эффективными или по крайней мере при тех же затратах решать более широкий спектр задач в развитии общества.

Констатируя данное утверждение, следует отметить, что эффективность реинжиниринга застройки напрямую зависит от соразмерности понесенных затрат и полученных результатов. В этой связи краеугольным элементом будет являться идентификация

объема реинжиниринга и сочетание его мероприятий применительно к конкретным объектам.

Масштаб и объем реинжиниринга застройки коррелируются с характером преобразования, изменениями ее количественных и качественных показателей. В этой связи можно предположить, что возможны две схемы реализации реинжиниринга застройки (рис. 5):

- 1) трансформация существующей застройки;
- 2) включение (добавление) новых объектов.

Каждая из указанных схем имеет свою вариативность. Так, в рамках первой схемы можно допустить:

- 1.1) полную трансформацию;
- 1.2) частичное (фрагментированное) изменение.

При полной трансформации существующей застройки (случай 1.1) выполняется комплекс мероприятий реинжиниринга в отношении всех ОКС, а при частичной (фрагментарной) — только в отношении отдельных зданий и сооружений из этой совокупности (случай 1.2).

Вторая схема предполагает:

- 2.1) замещение существующих ОКС;
- 2.2) возведение новых зданий и сооружений.

В случае 2.1 предусматривается снос уже существующего строения и на его месте возведение нового здания, сооружения с современными технико-экономическими характеристиками, но без изменения его функционального назначения, а в случае 2.2 возводится новый ОКС на свободном от застройки месте.

Воздействие на отдельное сооружение (в рамках 1.1, 1.2, 2.1), а также возведение нового здания или сооружения (2.2) реализуются как самостоятельные локальные инвестиционные проекты, входящие в состав общей инвестиционной программы реинжиниринга застройки.

Как уже отмечалось, локальный инвестиционный проект может реализовывать как одно, так и несколько мероприятий реинжиниринга. Представляется, что сочетание мероприятий реинжиниринга застройки подчинено определенным закономерностям, которые связаны с характером мероприятия, свойственных ему видов работ, а также типом застройки и ОКС.

В исследовании выделяются три варианта сочетания мероприятий реинжиниринга относительно установленных видов застройки (зон). Они приведены на рис. 6–8. Данные сочетания содержат мероприятия, которые:

- идентифицируют характер реинжиниринга застройки — это определяющие мероприятия;
- выполняют вспомогательную роль — это составляющие мероприятия.

Утверждается, что если определяющее реинжиниринг мероприятие может быть только одно, то возможно несколько составляющих.

При реинжиниринге жилой застройки можно выделить два варианта сочетания мероприятий:

- 1) с определяющим номером 1. Это — 1.2, 1.3 и 1.2.3;
- 2) с определяющим номером 4. Это — 4.1, 4.2, 4.3, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.3.

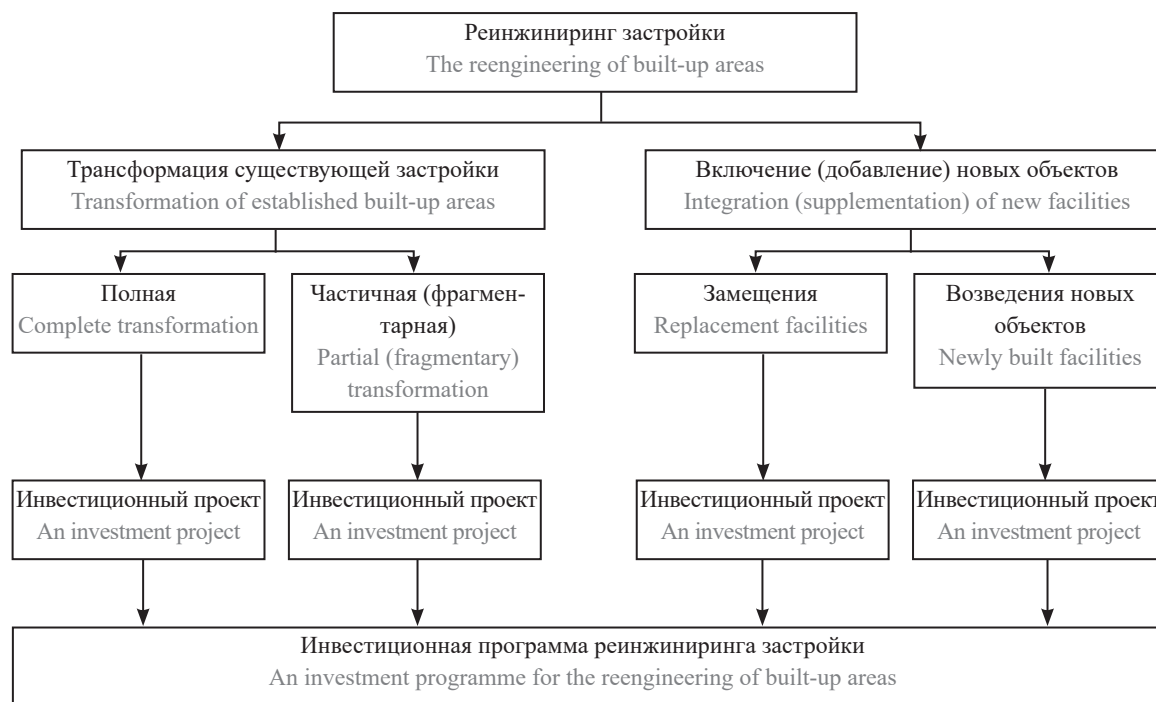


Рис. 5. Схема реализации реинжиниринга застройки

Fig. 5. The reengineering of built-up areas: an implementation scheme

	1. Реконструкция Reconstruction	2. Реновация Renovation	3. Новое строительство New construction	4. Перепрофили- рование Repurposing
1. Реконструкция Reconstruction		1.2	1.3	4.1
2. Реновация Renovation	1.2			4.2
3. Новое строительство New construction	1.3			4.3
4. Перепрофили- рование Repurposing	4.1	4.2	4.3	

Номер мероприя-
тия, составляющего
(дополняющего)
основное мероприя-
тие реинжиниринга
застройки
The number of an
action that represents
(supplements)
the principal action
for the reengineering
of built-up residential
areas

X. X

Номер мероприятия,
определяющего
характер реинжини-
ринга застройки
The number
of an action that
determines the nature
of the reengineering
of built-up residential
areas

Рис. 6. Сочетание мероприятий в составе реинжиниринга жилой застройки

Fig. 6. A combination of actions within the framework of the reengineering of built-up residential areas

	1. Реконструк- ция Reconstruction	2. Реновация Renovation	3. Новое строительство New construction	4. Перепрофили- рование Repurposing	5. Техническое переворужение Technical upgrading
1. Реконструкция Reconstruction		1.2	1.3	4.1	1.5
2. Реновация Renovation	1.2			4.2	5.2
3. Новое строительство New construction	1.3			4.3	5.3
4. Перепрофили- рование Repurposing	4.1	4.2	4.3		4.5
5. Техническое переворужение Technical upgrading	1.5	5.2	5.3	4.5	

Номер мероприя-
тия, составляющего
(дополняющего)
основное мероприя-
тие реинжиниринга
застройки
The number of an
action that represents
(supplements)
the principal action
for the reengineering
of built-up residential
areas

X. X

Номер мероприятия,
определяющего
характер реинжини-
ринга застройки
The number
of an action that
determines the nature
of the reengineering
of built-up residential
areas

Рис. 7. Сочетание мероприятий в составе реинжиниринга производственной застройки

Fig. 7. A combination of actions within the framework of the reengineering of built-up industrial areas

	1. Реконструкция Reconstruction	2. Реновация Renovation	3. Новое строительство New construction	4. Техническое перевооружение Technical upgrading	Номер мероприя- тия, составляющего (дополняющего) основное мероприя- тие реинжиниринга застройки The number of an action that represents (supplements) the principal action for the reengineering of built-up residential areas
1. Реконструкция Reconstruction		1.2	1.3	4.1	
2. Реновация Renovation	1.2			4.2	
3. Новое строительство New construction	1.3			4.3	
4. Техническое перевооружение Technical upgrading	4.1	4.2	4.3		Номер мероприятия, определяющего характер реинжини- ринга застройки The number of an action that determines the nature of the reengineering of built-up residential areas

Рис. 8. Сочетание мероприятий в составе реинжиниринга зон инженерной и транспортной инфраструктуры

Fig. 8. A combination of actions within the framework of the reengineering of engineering and transport infrastructure zones

Таким образом, основными мероприятиями реинжиниринга жилой застройки будут перепрофилирование и реконструкция, причем последнее может входить в состав первого.

Реинжиниринг производственной застройки характеризуется большим набором сочетаний мероприятий, чем при трансформации жилой застройки из-за их расширенной номенклатуры. В данном случае можно выделить три варианта сочетаний мероприятий:

- 1) с определяющим номером 1;
- 2) с определяющим номером 4;
- 3) с определяющим номером 5.

В указанных вариантах допускаются различные комбинации составляющих мероприятий, причем их приоритетность в таких переборах будет одинаковой.

Сложение мероприятий в составе реинжиниринга зон инженерной и транспортной инфраструктуры связано с отличительной особенностью: эти объекты нельзя перепрофилировать. Поэтому сочетания мероприятий определяются:

- пунктом 1 — реконструкция;
- пунктом 4 — техническое перевооружение.

Как и в предыдущих вариантах, комбинация составляющих мероприятий может быть разной при их равной приоритетности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе вышеприведенного можно констатировать, что структура и состав реинжиниринга застройки обладают существенной вариативностью, которая определяется ее типом, способом трансформации. Данный факт впоследствии оказывает влияние на сочетание мероприятий реинжиниринга, в рамках которого можно установить мероприятия, определяющие характер трансформации застройки и дополняющие основное преобразование (входящие в его состав). Выполненное исследование позволяет на этой основе сформировать организационные схемы реинжиниринга застройки и определить характер их ресурсообеспечения. В этой связи предполагается дополнительно установить распределение участников по этапам и видам реинжиниринга застройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оборин М.С. Инновации как фактор развития строительства // Экономика строительства и при-

родопользования. 2020. № 1 (74). С. 56–63. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-1-56-63

2. Страхова А.С., Унежева В.А. Инновационные технологии в строительстве как ресурс экономического развития и фактор модернизации экономики строительства // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 263–272.
3. Батоева Э.В. Определение наиболее эффективных инноваций в сфере жилищного строительства // Baikal Research Journal. 2017. Т. 8. № 4. С. 25. DOI: 10.17150/2411-6262.2017.8(4).25
4. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm // Construction Management and Economics. 2015. Vol. 33. Issue 5–6. Pp. 453–466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982
5. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction // 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723
6. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Жизненный цикл градостроительных решений: организационный аспект их реинжиниринга // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 33–39. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.33-39
7. Eskerod P., Huemann M., Savage G. Project Stakeholder Management — Past and Present // Project Management Journal. 2015. Vol. 46. Issue 6. Pp. 6–14. DOI: 10.1002/pmj.21555
8. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Организационные аспекты развития территорий и застройки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 58–70. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-58-70
9. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management // Civil Engineering Journal. 2016. Vol. 2. Issue 6. P. 262. DOI: 10.28991/cej-030986
10. Piyaraja K., Eyyaabal Z. Value engineering in construction // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8. Issue 32. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i32/87285
11. Мурад Алашкар Ийлаф Хишам, Курбангалеев Р.А., Хромов З.А. Реконструкция жилых зданий в г. Москва // Системные технологии. 2020. № 2 (35). С. 31–35.
12. Поташова М.Д., Цитман Т.О. Комплексное развитие городских территорий. Реновация микрорайона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 2 (28). С. 40–50.
13. Пономарев Е.С., Ившин К.С. Проектная стратегия территориального брендинга // Известия КазГАСУ. 2019. № 4 (50). С. 100–107.
14. Aleksanin A. Organization of a logistics system for waste streams during the renovation of territories // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 6. P. 062011. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062011
15. Lu M., Cheung C.M., Li H., Hsu S.-C. Understanding the relationship between safety investment and safety performance of construction projects through agent-based modeling // Accident Analysis & Prevention. 2016. Vol. 94. Pp. 8–17. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.014
16. Jones K., Martin B., Winslow P. Innovation in structural engineering — The art of the possible // Structural Engineer. 2017. Vol. 95. Issue 1. Pp. 14–21.
17. Толтинская Т.П., Альземеиева Е.В., Мамеева Ю.В. Основные направления реновационного процесса в преобразовании промышленных территорий под общественные пространства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 3 (29). С. 52–63.
18. Миролюбова Т.В., Николаев Р.С. Перспективы развития промышленных территорий крупных городов в региональной экономике // Ars Administrandi. Искусство управления. 2018. Т. 10. № 4. С. 569–597. DOI: 10.17072/2218-9173-2018-4-569-597
19. Гайдук А.Р. Реновация промышленных объектов и адаптация индустриальных зон городов к современным условиям (на примере г. Казань) // Известия КазГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 83–88.
20. Блинова Н.П., Дудурич Б.Б., Прокофьев В.Е., Янович К.В. Инновационные решения при проведении ремонтов и реконструкции сетей водоснабжения и водоотведения объектов военной инфраструктуры // Наука и военная безопасность. 2018. № 3 (14). С. 92–98.

Поступила в редакцию 20 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 1 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Борисович Сборщиков — доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017; sbs@mgsu.ru;

Павел Анатольевич Журавлев — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 756279; tous2004@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Oborin M.S. Innovation as a factor in the development of construction. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2020; 1(74):56-63. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-1-56-63 (rus.).
2. Strahova A.S., Unezheva V.A. Innovative technologies in construction as a resource of economic development and a factor of modernization of the construction economy. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 6:263-272. (rus.).
3. Batoyeva E.V. Determination of the most effective innovations in the field of housing construction. *Baikal Research Journal*. 2017; 8(4):25-35. DOI: 10.17150/2411-6262.2017.8(4).25 (rus.).
4. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm. *Construction Management and Economics*. 2015; 33(5-6):453-466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982
5. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction. *52nd ASC Annual International Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723
6. Sborshikov S.B., Zhuravlev P.A. Life cycle of urban planning solutions: the organizational aspect of their reengineering. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 4:33-39. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.33-39 (rus.).
7. Eskerod P., Huemann M., Savage G. Project Stakeholder Management — Past and Present. *Project Management Journal*. 2015; 46(6):6-14. DOI: 10.1002/pmj.21555
8. Sborshikov S.B., Zhuravlev P.A. Organizational aspects of territory development. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(3):58-70. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-58-70 (rus.).
9. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management. *Civil Engineering Journal*. 2016; 2(6):262. DOI: 10.28991/cej-030986
10. Ilayaraja K., Eqyaabal Z. Value engineering in construction. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015; 8(32). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i32/87285
11. Murad Alashar Ilaf Hisham, Kurbangaleev R.A., Khromov Z.A. Reconstruction of residential buildings in Moscow. *System Technologies*. 2020; 2(35):31-35. (rus.).
12. Potashova M.D., Tsitman T.O. Complex development of urban territories. Renaissance microdistrict. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2019; 2(28):40-50. (rus.).
13. Ponomarev E.S., Ivshin K.S. Territorial branding project strategy. *Izvestiya KazGASU*. 2019; 4(50):100-107. (rus.).
14. Aleksanin A. Organization of a logistics system for waste streams during the renovation of territories. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 365(6):062011. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062011
15. Lu M., Cheung C.M., Li H., Hsu S.-C. Understanding the relationship between safety investment and safety performance of construction projects through agent-based modeling. *Accident; Analysis and Prevention*. 2016; 94:8-17. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.014
16. Jones K., Martin B., Winslow P. Innovation in structural engineering — The art of the possible. *Structural Engineer*. 2017; 95(1):14-21.
17. Tolpinskaya T.P., Alzemeneva E.V., Mamaeva Ju.V. The main directions of the renovative process in transforming industrial territories to public spaces. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2019; 3(29):52-63. (rus.).
18. Mirolyubova T.V., Nikolaev R.S. Development Prospects of Large Cities' Industrial Territories in the Regional Economy. *Ars Administrandi*. 2018; 10(4):569-597. DOI: 10.17072/2218-9173-2018-4-569-597 (rus.).
19. Gaiduk A.R. Renovation of industrial facilities and adaptation of the industrial zones of the cities to modern conditions. *Izvestiya KazGASU*. 2016; 4(38):83-88. (rus.).
20. Blinova N.P., Dudurich B.B., Prokof'ev V.E., Yanovich K.V. Innovative solutions for repairs and reconstruction of water supply and sanitation networks of military infrastructure facilities. *Science and Military Security*. 2018; 3(14):92-98. (rus.).

Received July 20, 2021.

Adopted in revised form on November 1, 2021.

Approved for publication on November 8, 2021.

B I O N O T E S : **Sergej B. Sborshchikov** — Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017; sbs@mgsu.ru;

Pavel A. Zhuravlev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 756279; tous2004@mail.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.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Вionotes: **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.

