

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 10/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 10
2021**

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

Сквозной номер 155

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 10
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	26.10.2021.
Подписан в свет	29.10.2021.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,48. Тираж 100 экз. Заказ № 275	

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., 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

Корректор: Любовь Владимировна Светличная

Дизайн и верстка: Ольга Григорьевна Горюнова

Перевод на английский язык: Ольга Сергеевна Конакова

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. металлургических и деревянных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Павел Александрович Хаванов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. 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:	26.10.2021

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:** *Ol'ga G. Goryunova*

Russian-English translation: *Ol'ga S. Konakova*

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

Али Салмо, Е.В. Щербина, Л.Я. Алибрахим

Architectural and urban identity of Homs city

(Архитектурная и градостроительная идентичность города Хомс) 1285

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

В.Н. Савостьянов, Л.Ю. Фриштер

100 ЛЕТ: Фотоупругость — ЛИН–МИСИ–МГСУ 1297

Л.Ю. Ступишин

Прогрессирующее предельное состояние конструкций на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации. 1324

В.И. Колчунов, Ву Нгок Туен, Д.И. Нижегородов

Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии 1337

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.С. Лесовик, Р.С. Федюк

Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов. 1346

Эммануэль Микерего, Нестор Нийонзима, Жан Клод Нтирампбеа

Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi

(Влияние примесей местных строительных материалов на несущую способность бетона, используемого в составе конструкций на территории Бурунди) 1357

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.Н. Медведева, А.Ю. Чиликин

Определение вероятности возникновения аварий на сетях газораспределения и газопотребления 1363

В.И. Прохоров, М.А. Разаков

Моделирование тепловых режимов охлаждающих панелей в канализационных насосных станциях 1378

Д.Ю. Суслов

Экономико-математическая модель выбора системы газоснабжения на основе биометана и природного газа 1388

Требования к оформлению научной статьи 1397

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Ali Salmo, Elena V. Scherbina, Lina Yaser Alibrahim

Architectural and urban identity of Homs city. 1285

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

Vadim N. Savostyanov, Lyudmila Yu. Frishter

100-years' story of success: photoelasticity — LSR–MICE–MSUCE. 1297

Leonid Yu. Stupishin

Progressive limit state at critical levels of internal potential energy of deformation 1324

Vitaliy I. Kolchunov, Vu Ngoc Tuyen, Dmitriy I. Nizhegorodov

Dynamic response of the building construction system with a finite degree of freedom under a special action . . . 1337

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Valery S. Lesovik, Roman S. Fediuk

Increasing the performances of low permeable cement composites. 1346

E. Mikerego, N. Niyonzima, J.C. Ntirampeba

Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi. 1357

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Oksana N. Medvedeva, Aleksander Yu. Chilikin

Determining the probability of accidents on gas distribution and gas consumption pipelines 1363

Vitaly I. Prohorov, Muhammet A. Razakov

Thermal modes simulation of cooling panels in waste water pumping stations 1378

Denis Yu. Suslov

Economic and mathematical model of selecting a gas supply system based on biomethane and natural gas 1388

Requirements for research paper design 1397

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

RESEARCH PAPER

UDC 711.4 (569.1)

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1285-1296

Architectural and urban identity of Homs city

Ali Salmo¹, Elena V. Scherbina¹, Lina Yaser Alibrahim²

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

² Municipality of Homs city; Homs, Syria

ABSTRACT

Introduction. The article aims to determine the architectural and urban planning elements that give buildings and residential neighborhoods their identity in Homs city in Syria. During the last century, environmental and social problems have accumulated. The city's parts have subjected to many violations in the construction processes and the weak construction laws. Within the past ten years, the war crisis in Syria caused massive destruction in the old city too. Together, all these factors contributed to losing an important and essential part of the city's structure.

Materials and methods. Throughout retrospective and comparative analysis, in addition to observations and photographic recordings, the basic architectural and planning features in the city of Homs have been identified. These features distinguish Homs from the rest of the Syrian cities. The merging process of social and environmental characteristics and their interconnectedness shaped the so-called "Homs" identity.

Results. The research concluded that Homs' city possesses unique planning and architectural characteristics that distinguish it from other Syrian towns despite the historical connection between the Syrian cities. Thus, the character and the city's architectural and urban identity have developed, so architects and urban planners should not ignore this identity in the next stage of recovery and reconstruction.

Conclusions. This lost identity of Homs must be reintroduced creatively in the next stage of reconstruction because it carries the meanings of environmental sustainability in addition to being a historical and cultural legacy that cannot be neglected in the future if we ignored it now, all the attempts to revive only the visual image of the city will not save the identity and will generate a fake and weak personality of the city.

KEYWORDS: architectural and urban identity, image of the city, post-war reconstruction, sustainable development, Syrian war crisis, old city of Homs, compact design, courtyard houses, cultural heritage

FOR CITATION: Salmo A., Scherbina E.V., Alibrahim L.Y. Architectural and urban identity of Homs city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1285-1296. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1285-1296

Corresponding author: Ali Salmo, alisalmorussia1993@gmail.com.

Архитектурная и градостроительная идентичность города Хомс

Али Салмо¹, Елена Витальевна Щербина¹, Лина Ясер Алибрахим²

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

² Муниципалитет города Хомс; г. Хомс, Сирия

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель статьи — выявить элементы архитектуры и градостроительства, которые придают идентичность зданиям и жилым районам сирийского города Хомс. Социальные проблемы, а также проблемы окружающей среды накапливались на протяжении последнего столетия. Разные части города пострадали от многочисленных нарушений, допущенных в процессе строительства, что стало результатом несовершенного строительного законодательства. За последние десять лет сирийский военный кризис вызвал массовые разрушения и на территории старого города. В целом все указанные факторы привели к утрате существенной части городской структуры.

Материалы и методы. Основные архитектурные и градостроительные особенности города Хомс установлены с помощью ретроспективного и сравнительного анализа, использованных в дополнение к наблюдениям и фотофиксации. Эти особенности отличают Хомс от других сирийских городов. Процесс слияния социальных характеристик со спецификой окружающей среды, а также их взаимосвязь привели к образованию так называемой «идентичности Хомса».

Результаты. Сделан вывод о том, что Хомс обладает уникальными градостроительными и архитектурными чертами, которые отличают его от других сирийских городов, несмотря на наличие исторической связи между ними. Таким

образом развивается своеобразие, архитектурная и градостроительная идентичность города, которую архитекторам и градостроителям следует принять во внимание на следующем этапе восстановления и реконструкции.

Выводы. Утраченную Хомсом идентичность необходимо творчески восстановить на следующем этапе реконструкции, поскольку она несет в себе смыслы экологической устойчивости в дополнение к историческому и культурному наследию, которыми нельзя пренебрегать в будущем, притом, что они игнорируются в настоящем. Все попытки возродить исключительно внешний вид города не спасут его идентичность, а приведут к созданию фальшивой и слабой городской индивидуальности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурная и градостроительная идентичность, имидж города, послевоенные восстановления, устойчивое развитие, военный кризис в Сирии, старый город Хомса, компактная планировка, дом со внутренним двором, культурное наследие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Салмо А., Щербина Е.В., Алибрахим Л.Я. Architectural and urban identity of Homs city // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1285–1296. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1285-1296

Автор, ответственный за переписку: Али Салмо, alisalmorussia1993@gmail.com.

INTRODUCTION

The city of Homs went through many historical stages that formed its architectural and urban identity. Since the year 280 BC, Homs was a Greek after that a Roman settlement, and it was followed by successive stages of the Islamic era (Umayyad, Abbasid, Ayyubid, and Mamluk), which was followed by Ottoman rule, and finally, the French mandate that ended with the independence of Syria 1946 year [1].

Homs has architectural and planning elements that distinguish it from those in Damascus or Aleppo [1], for example, the final evolutionary sequence of these elements and the changes that occurred to them formed the final visual identity of the city. To define the architectural elements, these elements must be studied clearly according to their functions and materials, this will help to shape the specific architectural and urban image, which will contribute later to form clear visual models that are far from exaggerated and nearer to the soul of the city. In previous studies, the idea of defining the urban and architectural identity of Syrian cities was addressed, but from different aspects.

For example, during a study in the historical development of Palmyra, it was indicated that if the historical master plan of the city is preserved, taking into account the social and economic needs and the general fabric of the city, then the urban identity of the city and in particular the general Roman character of the ancient city will be preserved [2].

In another study on determining the planning significance of the architectural identity in Homs, it was pointed out that the elements of cultural heritage are the only basic components of the architectural identity in Homs, and that if these elements are classified and attributed to their level of destruction in the old city, this will contribute to restore the architectural identity in the city of Homs [3, 4].

The population's needs were also important in some studies. Through social questionnaires, the psychological and social needs of the population in the city of Homs were determined. Accordingly, external and internal factors were identified to form a proposed strategy for the sustainable development of the city [5].

Now, 10 years after the Syrian war crisis, efforts are directed towards documenting and preserving the Syrian tangible heritage of old cities [6, 7], also, in the city of Homs, work is underway to develop a general plan for the city. During the development of this plan, it is very important to take into account the importance of the place and the value of the cultural heritage elements of the urban identity. and that is why the local and international community realizes that preserving the image and identity of cities lost because of wars and disasters is of importance at the social and environmental levels at the same time.

Therefore, it is imperative to study the historical, cultural and architectural urban elements of the city that express its identity, which should be taken into account in the development of the program and master plan for the forthcoming post-war reconstruction. This determined the purpose of the research carried out — to determine the architectural style of the historical city of Homs, which includes distinctive architectural and urban elements related to different historical ones, which is often called “Homsī”. This style is the cumulative and evolutionary product of all civilizations in Syria, especially in Homs. Thus, the task is to analyze the historical formation of the city based on field observations and archival materials.

Hypothesis: clear allocation of architectural elements defining urban identity will ensure urban planning to take into account the preservation of cultural heritage sites and urban identity.

The social importance of the city's image in the minds of its residents supports their sense of belonging to their street, neighbourhood or city, and contributes to enhancing the roles of individuals in the development of their environment and societies. with the aim of strengthening the relationship between the citizen returning from internal or external displacement and his place of residence.

The environmental importance of the city's image throughout the history of Homs supported the comfort (physical and psychological) of the inhabitants. For example, the traditional “Homsī” house, with its inner courtyard filled with jasmine trees and water elements such as fountain and Salsabil, also the study of shading,

colors, and textures of materials, formed a small local environment that respected the privacy and human scale of the residents and gave them in all seasons a state of comfort [8].

The term “Homsī” has been mentioned in the local literatures of Syrian architecture, this word is an adjective from the name of the city Homs, another name is used also to describe the architecture technique which is named as “Ablaqi Homsī”.

MATERIALS AND METHODS

In this study, historical materials and the author’s notes, Homs city architectural heritage archived or published data were used. The methods that are used, systematic comparative and visual analysis, the instrument of these methods is the detailing method, throughout the study of architectural and urban planning documents in Homs, authors used previously studied literature in this field too, to determine the urban and architectural elements of Homs city identity [9–16]. The architecture style of Homs was characterized by using combination of materials such as white and black local stones, besides the use of some clay materials in the external cladding, woods and bricks also were noticed through observations, which is an early use of sustainable materials. On the level of shapes, Roman elements were used with arches, doors, and columns. Islamic elements, and shapes such as Spherical domes, Vaults, Muqarnas, and Mashrabiya also were found in old “Homsī” houses [14–16].

The French mandate also tried to add or renew some elements such as wooden gable roofs, small balconies, and high vertical windows that were decorated with pre-made steel. These features created the architectural iden-

tity of the city of Homs, so these elements distinguished Homs city from other cities in Syria, the following points will briefly identify the architectural characteristics of this style:

1) Inserting an ancient Roman architectural element such as arches, columns, entablatures, vaults, pediments, (or a part of them) in windows, doors, entrances (influence of Roman architecture);

2) Using locally produced materials such as basalt or limestone in facades, ceilings, and floors and also adding Islamic architectural elements like Mahsrabiya, Wind catchers, and fountains (influence of the Islamic architecture);

3) Using red brick tiles and fine steel elements in roofs, facades, and decorative elements besides the use of glass (influence of the French architecture);

4) Inserting elements of green plants logically, without exaggerations, to achieve their aesthetic and environmental goals;

5) All these elements were subjected to architectural scale studies that were related to the precise geometric proportions that suit the human dimensions and his privacy. All these points supported the urban structure for each old house, which formed the larger, stronger structure of the old neighborhood and finally the old city [13].

So in order to understand the classifications of the objects of cultural heritage and other elements that shaped the Homsī identity the following (Table 1, 2) will explain specific elements of the “Homsī” architectural and urban style that followed the previous points, and according to functional use of territories the highlighted architectural features of old Homs city will be provided in (Fig. 1).

Table 1. The architectural elements of the traditional “Homsī” house

No.	Element (photo)	Element name	Discription of element
1		Inner courtyard	It is a space with an open ceiling inside of Arab Homsī house, creates an interior environment, which is isolated visually and acoustically, also contributes to light the rooms, as it contains important environmental elements, such as water elements, plants and trees
2		Iwan	It is a room opened to the inner courtyard that was studied in order to be used in shade to protect residents from the sun’s rays

Continuation of the Table 1

No.	Element (photo)	Element name	Discription of element
3		Upper and lower Corridors	The architect in Homs used the corridors to achieve the thermal gradient and to limit the movement in front of the rooms and halls, in order to create a transition area from the rooms to the inner courtyard, so that the internal temperature of the rooms can be kept lower than the temperature of the inner courtyard in summer, and higher in winter
4		Openings and windows	The size of the small windows helped to maintain the air pressure between the internal and external spaces, because their small size in summer, will help in introducing a cold airflow, and in winter, their small size will reduce thermal loss
5		Domes	Domes have been used in mosque architecture, so that they have acoustic and structural uses as well, but they can also be seen in the architecture of the Homs house, because they have a role in reducing the intensity of the sun's rays as they regulate the movement of air through the windows at the base
6		Mashrabiya	They are wooden elements added to the large windows that help block the sunlight and heat and regulate the movement of air. They have a role in enhancing privacy as they prevent vision from outside to inside and allow vision from the inside out
7		Fountain	The location of the fountain is chosen on the axis of the Iwan, thus adding a special aesthetic character to the inner courtyard, with its plants and also because of the sound of water
8		Sibat	It is a protrusion of the building over the entire street space, helping to expand the area of the upper spaces of the house, and it may cover long distances to form a shaded area at the bottom, thus helping the movement of air in the street due to its formation of a pressure difference between the areas of shadows and the areas exposed to sun radiation

End of the Table 1

No.	Element (photo)	Element name	Discription of element
9		Ornaments	The ornaments and decorations in the Homs house are varied, they are two types, some of them spread on the internal walls, floors, and ceilings, and some of them spread on the outer walls. Most of the decorations were geometric, especially the shapes that express Islamic architecture in square or octagonal shapes with Arabic fonts. There are also animal ornaments in the form of conflicting lions, and these decorations are mostly from the Mamluk era [14]

Table 2. The urban planning elements of the old Homs city

No.	Element (photo)	Element Name	Discription of element
1		Residential house	It is a dwelling for one or several families, characterized by its simple and environmental design, as it is closed to the outside and open to an internal environment, in order to achieve a high degree of privacy that suits the needs of the population at that time, and the design based on the study of shade and light helped to resist the factors of the external atmosphere [14, 15]
2		Residential Neighborhood	The old residential neighborhood in Homs has a two-dimensional structure characterized by an irregular configuration, whereby a group of residential buildings define the streets. The streets are narrow, continuous, and not straight. As for the spatial (three-dimensional) structure of the residential neighborhood, it is characterized by being horizontal that does not rise much, and the difference in height between residential buildings is small, in order to calm the winds and cast shadows on the streets and thus to control the temperature day and night, by controlling the air pressure differences and preserving the heat
3		School	The school had a special significance associated with religious buildings (churches or mosques) for religious education. However, the link was strengthened under the Ottoman rule, as the school's role evolved to include reading rooms, lecture rooms, and teachers' rooms. The school had two sections for summer and winter education, and its location was not limited to the old city
4		Hammam (Bathroom)	It was intended as a place for public bathing. The Hammam (bathroom) had social and recreational significance, although the idea of the bath was present in Islam, it was before in Roman and Byzantine eras. The people of the city used to go to it in the morning with the intention of bathing, because their homes were far from their work place, but at night, people used to go to it for the purpose of recreation and meetings

No.	Element (photo)	Element Name	Discription of element
5		Markets	The markets were clustered around the Big Mosque in Old Homs, and they were also distributed along a pedestrian axis on the right and left of it. One of the most important features of the Homs old markets is that they were distributed according to the type of products. There were markets of great importance near the mosque, such as the markets for perfumes, books and gold. As for the less important markets such as fabrics and food, they were a little further from the mosque. And the markets related to the iron and wood industry were the least important. It is interesting that there were markets for women, and also special markets for fake goods [14, 15]
6	  	Religious Buildings Churches Big Mosque Small mosque	The ancient city of Homs includes one of the oldest churches in the world, Saint Mary Church of the Holy Belt. In addition, other small churches were widespread in the Old City, which indicates the state of religious coexistence in the city of Homs The Big Mosque was a center for three main activities (social-commercial-religious) and its size was large to accommodate a larger population. Later, with the increase in the population, commercial and social functions were separated, to preserve only its religious function. The mosque, with its minaret, constituted the highest building in the Old City, so that it imposed architectural control over the rest of the residential buildings [15] The other mosques that are located in the old Homs, are smaller, and they are spread in the old city, closer to the (prayer halls) than to be mosques. Minarets were also lower than the minaret of the Big Mosque [15]

General features of the old city of Homs:

Homs has a dry desert nature, so the conditions and possibilities that were available to the architect in Homs determined urban and architectural work in this city, in (Table 3) the urban typology of the city was defined according to functions and coloristic style also main and secondary elements that fall between them, however here are several important features that shaped the city:

1. The Closure feature characterizes the general structure of the old city of Homs:

This is because it was surrounded by a wall. The closure of the city was general and included all the elements of the city in all its different functions, not only residential buildings but also social buildings, such as

mosques, schools and bathrooms [15, 16]. This closure reflected positively on the city, because it has become an integrated and compacted unit. Thus, the goal for which it was planned and designed was achieved.

2. Wide Wall surrounded the old city of Homs:

The perimeter of the wall is 4,200 meters, the height ranged from 5 to 8 meters and the wall had 4 doors in the Roman era, but in the Abbasid era they became seven doors.

This wall in some of its parts was surrounded by a ditch and was filled with water sometimes. The seven gates surrounding the old city defined the directions of the major streets of the city which were divided into two main types (the branch) and (the path) [15–17]. These

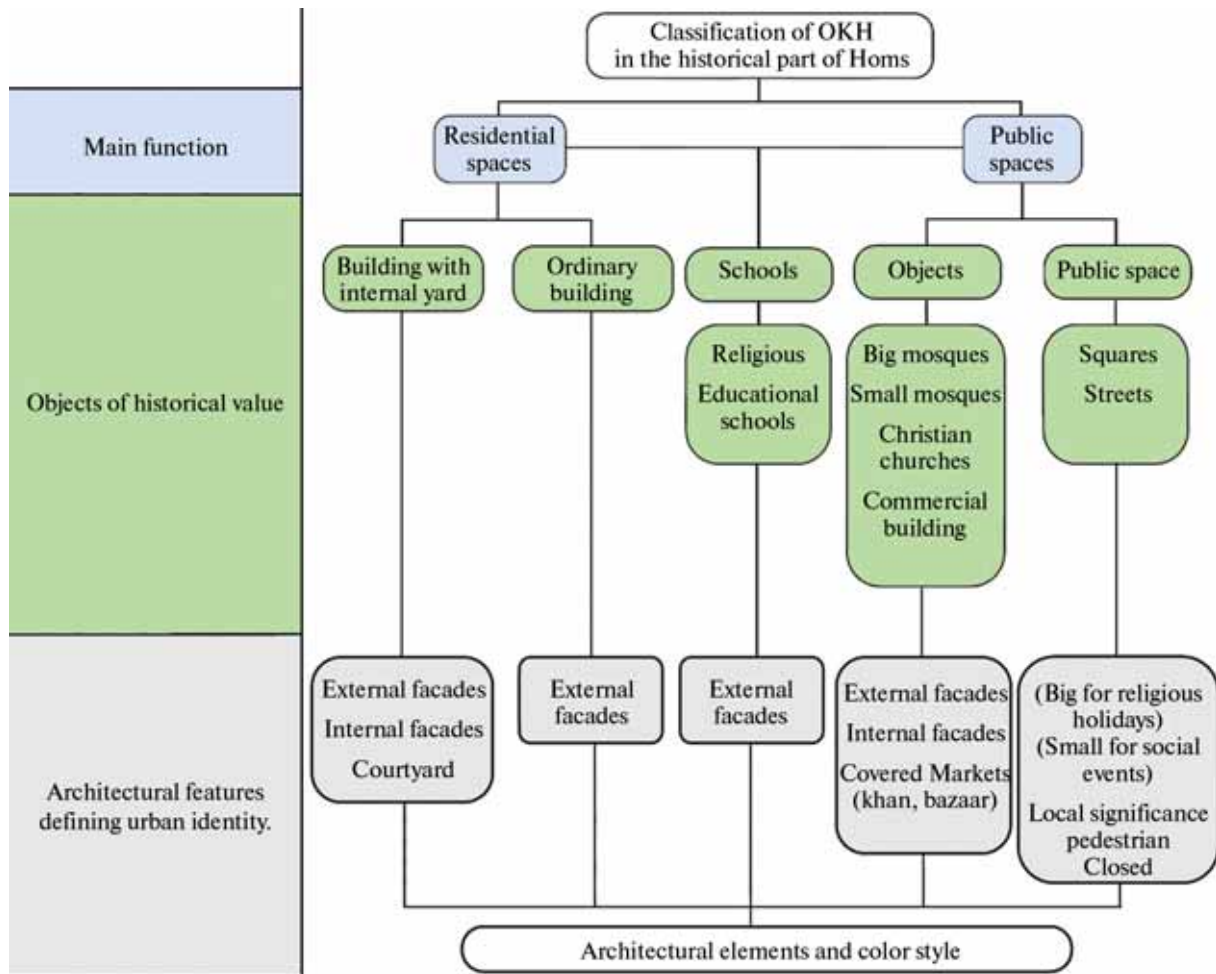


Fig. 1. Classification of OCH based on urban territories division by functional use that highlighted architectural features of old city of Homs

streets were open from one side and ended with a small square for the use of religious and social celebrations, and therefore only for the residents of those neighborhoods. The width of the street in Old Homs varies and is not fixed, depending on the assigned function, so the transportation network inside the Old City is unclear.

3. The Big Mosque and market dominated all other activities in the old city:

Where the major streets meet, the Big Mosque dominated all other elements such as schools, caravansaries, and even residential buildings in the old city inside the wall. To protect from the terrible weather in summer and winter. The centre of the old city is not in the geometric centre of the old city. Rather, it was near the Great Mosque to the north-western side of the old city [17–19]. Significant social buildings were along the major streets connecting the old city centre and the gates. The most important social buildings small mosques, bathrooms, and schools.

4. The old city of Homs comprised a group of administrative residential neighbourhoods:

8 neighbourhoods formed the old city, the neighbourhoods separated from each other by main and secondary streets, each neighbourhood comprising a group

of residential buildings and small shops for selling daily items, besides small buildings such as the school, the mosque and the hammam [20].

5. The internal spaces of buildings were distinguished by their artistic beauty and functional exploitation:

The internal spaces added to the general shape of the old city a distinctive planning character, the inner courtyard of each house was a place for a social meeting where the family would sit and enjoy peace and comfort, and at the level of the old city, these courtyards were the lung that the ancient city breathes through.

According to what was previously reached (Fig. 2) shows the general planning and urban features of the ancient city of Homs in order to understand a general composition of the urban identity in the city.

RESULTS OF THE RESEARCH

1. Homs city has a distinctive architectural and urban planning style:

Despite the similarity of some characteristics in ancient Arab cities with the old city of Homs, the old city

Table 3. The urban typology of the old city of Homs

Main function	Object	Main element	Architectural element	Coloristic style					
				Ablak Style		Common			
				Materials					
				Black stones	White stones	Wood	Metal	Masonry on clay mortars	Glass
Living spaces	Residential buildings with a courtyard	Internal facades	Iwans	+	+	–	–	+	–
			Upper and lower corridors	+	+	+	+	+	–
			Windows and doors	+	+	+	+	+	+
		External facades	Domes	+	+	+	–	+	–
			Sibat	+	–	+	–	+	–
			Mashrabiya	–	–	+	–	+	–
			Windows and doors	+	+	+	+	+	+
		Courtyard	SAF (Fountain, sculpture)	+	+	–	–	+	–
			Paving	+	+	–	–	+	–
			Green elements	Vertical or hanged elements					
Public spaces	Big mosques	Facades	Windows and doors	+	+	+	+	+	+
			Walls	+	+	–	–	+	–
		Square	Flooring	+	+	–	–	+	–
		Corridors	Arches	+	+	–	–	–	–
			Columns	+	+	–	–	+	–
		High minaret	Openings and windows	+	+	–	–	+	+
	Small mosques	Facades	Windows and doors	+	+	+	+	+	+
			Walls	+	+	–	–	+	–
		Short minaret	Openings and windows	+	+	–	–	+	–
	Christian churches	Facades	Windows and doors	+	+	+	+	+	+
			Walls	+	+	–	–	+	–
	Commercial buildings	Covered markets (khan, bazaar)	Ceilings	–	–	+	+	+	–
			Walls	+	+	–	–	+	–
			Windows and doors	+	+	–	+	+	–
	Schools	Religious (takkiya — madrasa) And Educational	Ceilings	+	+	–	–	+	–
			Walls	+	+	–	–	+	–
			Windows and doors	+	+	+	+	+	+
	Hammam	Internal facades	Waiting zones	+	+	+	–	+	–
			Bathing zones	+	+	–	–	+	+
			SAF (Fountain, sculpture)	+	+	–	–	+	–
		External facades	Windows and doors	+	+	–	–	+	–
	Squares	(Large) for religious holidays		The dimensions of the sites and their finishing materials depend on the distance from the Grand Mosque					
		(Small) for social events							
	Streets	Local significance		Local streets are asphalted. the rest of the streets are narrower and built of basalt stones					
		Pedestrian							
		Closed-end							

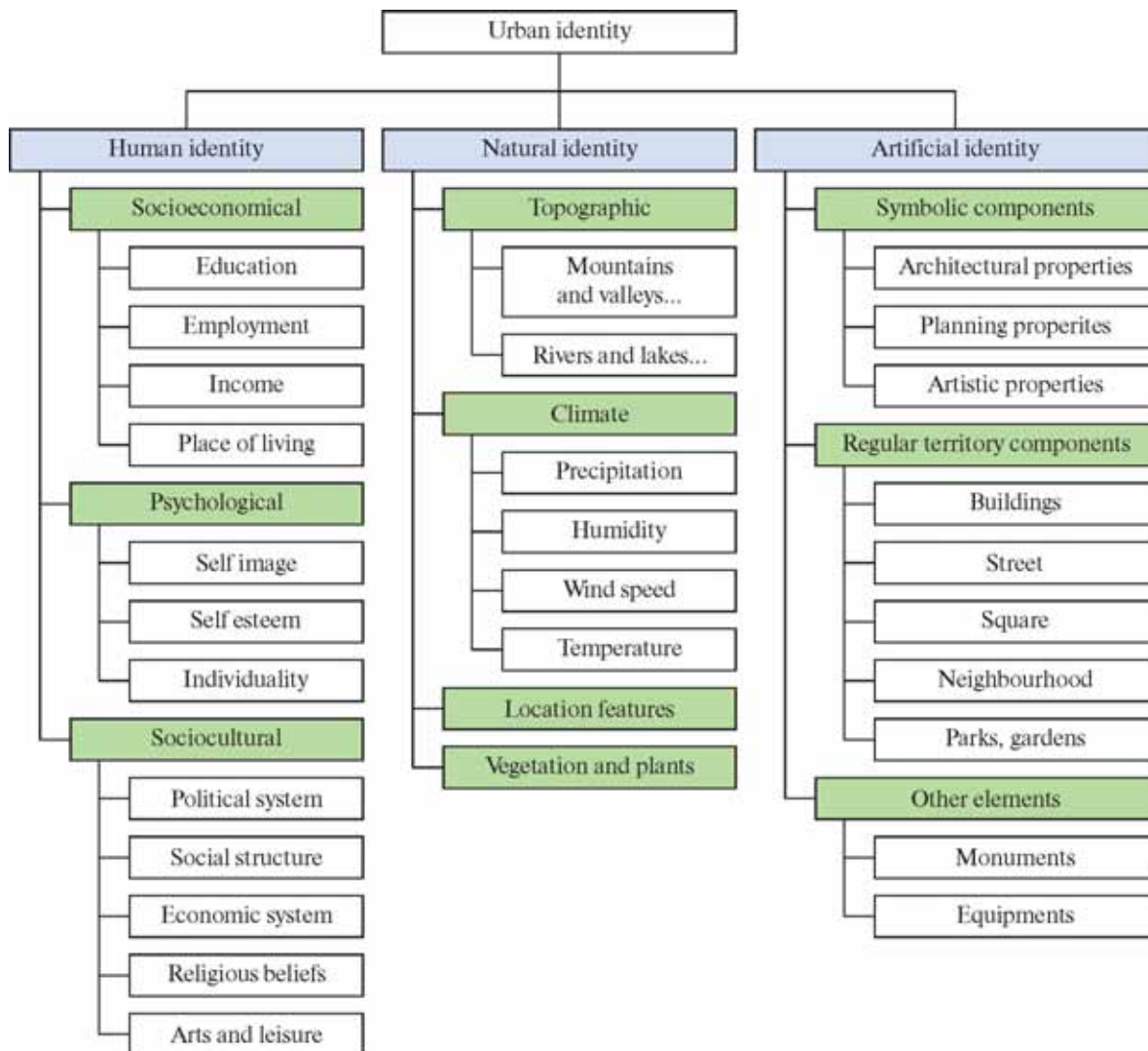


Fig. 2. The figure shows the complicated formation of urban identity of a city, made by authors

of Homs possesses a set of architectural and urban characteristics that distinguish it from other Syrian cities.

2. Homs developed a complicated structure of the architectural and urban identity:

The architectural and urban identity of the ancient city of Homs is not limited to the visual image of the city, but is a set of environmental and social features and characteristics that have been formed over time, which are the outcome of the accumulation of natural characteristics (geographical location and climatic features) and artificial characteristics (architectural elements, streets, buildings, squares, markets, etc.). Besides the amalgamation of these characteristics with social customs and traditions resulting from religious and ethnic coexistence and the resulting socio-economic transactions that ultimately formed the so-called “Homs” identity.

3. Post-war reconstruction has to possess advanced technologies that respect the city's identity:

The destruction in the city because of the war in Syria requires a pause in order to spot the errors before the war as well, to correct the mistakes that occurred in

the last century resulting from building violations and weak building codes in the old city of Homs. This is because reconstruction without going back to history will lead to the loss of the urban and architectural identity of this city forever.

The analysis discussed the importance of reviving the architectural and urban identities of the old city of Homs, and reviewed the necessity of returning to the traditional environment of the old city in Homs, which has endured for hundreds of years, unlike the new architectural and urban environments that are devoid of life and very far from human requirements.

The general structure in Old Homs was able, with the simplest means, to secure human needs for comfort in addition to preserving the natural resources that still remain today in the traditional Arab homes in Homs.

The modern trends in construction and planning, especially in the reconstruction phase, should benefit from previous experiences, to solve current problems, and how to take advantage of modern technologies in the formation of a modern urban environment character-

rized by technological progress and also bearing the true identity of the city.

The next challenge for the architect in Homs is to create a flexible and sustainable architectural and urban environment that restores its identity (social and environmental) by imposing a building control system that respects the traditional heritage in Homs and also by reducing building violations, in a way that guarantees opportunities for future generations, and takes advantage of the reconstruction phase to recover the lost identity of Homs.

The study concluded by identifying the distinctive elements of the architectural and urban identity of the old city of Homs, in addition to the important planning features of the city that are related to the nature of religious and social life in it, and the necessity of returning in the next stage of recovery and reconstruction to the compact models and structures, because they respect the environment and the human being. And it preserved the resources for hundreds of years.

Noting that the current attempts to retrieve the image of the city through the external appearance only, are nothing but naive attempts to cover the distorted urban

body with beautiful architectural clothing, and this will not address the deep problems facing the citizen in Homs.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In this study, representations of urban identity were expanded, which express the distinction and difference of urban characteristics in the old city of Homs from other cities:

- the classification of the major city planning elements that make up the identity of town planning is revealed;
- the main architectural elements bearing historical values and expressing the Homs architectural identity were highlighted;
- thus, the studies conducted in the creation of new urban design and planning areas have allowed the use of elements of urban planning identity to create an environment that is conducive, comfortable and environmentally friendly to humans.

Based on this, it is possible to pave the way for the development and restoration of devastated areas on the basis of restoring the traditional urban identity of the city of Homs in all parts of the city, not just in the old city.

REFERENCES

1. Mansour A., Teba T., Melis A. Domestic architecture and the city identity: the historic city of Homs and its traditional courtyard houses as a case study. *Cities' Vocabularies: The Influences and Formations*. 2021; 3-23. DOI: 10.1007/978-3-030-51961-2_1
2. Alsous M.M. Historical development of Palmyra in the aspect of the formation of the General plan of the city. *Sustainable Development of Territories : Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2018; 188-192. (rus.).
3. Belal A.A. Elements of urban identity in Homs (Syrian Arab Republic). *Sustainable Development of Territories : Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2018; 193-197. (rus.).
4. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities. *Sustainable Development of Territories : Collection of Reports of the II International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2019; 108-110. (rus.).
5. Alekseev Yu., Mourad Alashkar E.H., Rukosueva E., Majorzadehzahiri A. Consideration of interests of Homs residents when renovating a residential building after destruction. *Bulletin of BSTU Named after V.G. Shukhov*. 2020; 7:66-74. DOI: 10.34031 / 2071-7318-2020-5-7-66-74 (rus.).
6. Shcherbina E.V., Belal A.A., Salmo A. Historic centres of Syrian towns ruined by the war: restoration through urban planning. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(5):632-640. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.632-640 (rus.).
7. Rahme R. Post-war reconstruction in the context of historic preservation. *Masters' dissertation*. 2018.
8. Kassouha S. Towards a strategy for regaining cultural identity in the urban reconstruction of the war-ravaged city centre of Homs, Syria. *Masters' dissertation*. 2014.
9. Barakat H., Jabbour Z. Environmental Sciences. *Al-Baath University Journal*. 2015; 1:227-247.
10. Al-Zahrawi N. Archaeological and heritage Ablakia architecture in Homs city: a documentary study. *Al-Baath university Journal*. 2007; 8:8-223.
11. Barakat H., Jabbour Z. Town planning theories. *Al-Baath University Journal*. 2000; 3:29-54.
12. Almasri E. The rehabilitation of urban environment in Homs old City Syria. *Damascus University Journal*. 2013; 30(2):87-112.
13. Dayoub T. Medieval architecture: Islamic and European architecture. *Al-Baath University Journal*. 2001; 5:162-171.
14. Massouh I. Modern Trends in reviving residential buildings in the nuclei of Traditional Arabic Cities. *Masters' dissertation*. 2008; 16-80.
15. Shcherbina E.V., Belal A.A. The value of historical and cultural heritage in the reconstruction and restoration of cities. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019;

14(4):417-426. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.417-426 (rus.).

16. Al-Dbiyat M. Bibliographie. *Homs et Hama en Syrie centrale*. 1995; 325-349 DOI: 10.4000/books.ifpo.3668

17. Mansour H. The lost identity of the city: The case of Damascus. *CITTA 8th Annual Conference on Planning Research*. 2015; 1-21.

18. Esaulov G.V. On identity in architecture and urban planning. *Academia. Architecture and Construc-*

tion. 2018; 4:12-18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18 (rus.).

19. Rikhert A.E., Agisheva I.N. Identity in architecture and town planning as a key factor in the development of a historic city. *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2019; 3(49):71-79. (rus.).

20. Skalkin A. Architectural identity of the city: concept and research methods. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 43:87-97. (rus.).

Received July 11, 2021.

Adopted in revised form on September 30, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

BIONOTES: **Ali Salmo** — master of Urban Planning, Postgraduate Student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 485908, ResearcherID: Q-6673-2016, ORCID: 0000-0002-8595-2101; alisalmorussia1993@gmail.com;

Elena V. Scherbina — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-6797-7559; scherbinaEV@mgsu.ru;

Lina Yaser Alibrahim — bachelor of architecture, Head of Urban Planning sector; **Municipality of Homs city**; Al Kouwatli shosse, Homs, Syria; ResearcherID: AAK-2569-2021, ORCID: 0000-0002-3332-9190; linaalibrahim26@gmail.com.

Contribution of the authors:

Salmo A. — research concept; methodology development; writing the draft; follow on revision of the text; final conclusions.

Scherbina E.V. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; follow on revision of the text; final conclusions.

Alibrahim L.Y. — processing of research materials; preparation of individual sections of the text; participation in the discussions of the conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mansour A., Teba T., Melis A. Domestic architecture and the city identity: the historic city of Homs and its traditional courtyard houses as a case study // *Cities' Vocabularies: The Influences and Formations*. 2021. Pp. 3–23. DOI: 10.1007/978-3-030-51961-2_1

2. Алсуз М.М. Историческое развитие Пальмиры в аспекте формирования Генерального плана города // *Устойчивое развитие территорий* : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 188–192.

3. Белал А.А. Элементы городской идентичности г. Хомс (Сирийская Арабская Республика) // *Устойчивое развитие территорий* : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 193–197.

4. Белал А.А. Типологический анализ архитектурных форм арабских городов // *Устойчивое развитие территорий* : сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. М., 2019. С. 108–110.

5. Алексеев Ю.В., Мурад Алашкар И.Х., Рукосуева Е.А., Маджорзадехахири А. Учет интересов

жителей г. Хомс при реновации жилой застройки после разрушения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 7. С. 66–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-66-74

6. Щербина Е.В., Белал А.А., Салмо А. Градостроительное восстановление исторических центров сирийских городов, разрушенных войной // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 5. С. 632–640. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.632-640

7. Rahme R. Post-war reconstruction in the context of historic preservation // *Masters' dissertation*. 2018.

8. Kassouha S. Towards a strategy for regaining cultural identity in the urban reconstruction of the war-ravaged city centre of Homs, Syria // *Masters' dissertation*. 2014.

9. Barakat H., Jabbour Z. Environmental Sciences // *Al-Baath university Journal*. 2015. Vol. 1. Pp. 227–247.

10. *Al-Zahravi N.* Archaeological and heritage Ablakia architecture in Homs city: a documentary study // *Al-Baath university Journal*. 2007. Vol. 8. Pp. 8–223.
11. *Barakat H., Jabbour Z.* Town planning theories // *Al-Baath university Journal*. 2000. Vol. 3. Pp. 29–54.
12. *Almasri E.* The Rehabilitation of Urban Environment in Homs old City–Syria // *Damascus University Journal*. 2013. Vol. 30. Issue 2. Pp. 87–112.
13. *Dayoub T.* Medieval architecture: Islamic and European architecture // *Al-Baath university Journal*. 2001. Vol. 5. Pp. 162–171.
14. *Massouh I.* Modern Trends in reviving residential buildings in the nuclei of Traditional Arabic Cities // *Masters' dissertation*. 2008. Pp. 16–80.
15. *Щербина Е.В., Белал А.А.* Значение объектов исторического и культурного наследия при реконструкции и восстановлении городов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4. С. 417–426. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.417-426
16. *Al-Dbiyat M.* Bibliographie // *Homs et Hama en Syrie centrale*. 1995. Pp. 325–349. DOI: 10.4000/books.ifpo.3668
17. *Mansour H.* The lost identity of the city: The case of Damascus // *CITTA 8th annual conference on planning research*. 2015. Pp. 1–21.
18. *Есаулов Г.В.* Об идентичности в архитектуре и градостроительстве // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 4. С. 12–18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18
19. *Рихерт А.Э., Агишева И.Н.* Идентичность в архитектуре и градостроительстве как ключевой фактор развития исторического города // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. № 3 (49). С. 71–79.
20. *Скалкин А.* Архитектурная идентичность города: понятие и методология исследования // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2018. № 2 (43). С. 87–97.

Поступила в редакцию 11 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 30 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Али Салмо** — магистр градостроительства, аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 485908, ResearcherID: Q-6673-2016, ORCID: 0000-0002-8595-2101; alisalmorussia1993@gmail.com;

Елена Витальевна Щербина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-6797-7559; scherbinaEV@mgsu.ru;

Лина Ясер Алибрахим — бакалавр архитектуры, руководитель сектора градостроительства; **Муниципалитет города Хомс**; г. Хомс, Аль-Куватли шоссе, Сирия; ResearcherID: AAK-2569-2021, ORCID: 0000-0002-3332-9190; linaalibrahim26@gmail.com.

Вклад авторов:

Салмо А. — концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; доработка текста; итоговые выводы.

Щербина Е.В. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Алибрахим Л.Я. — обработка материалов и подготовка отдельных разделов текста; участие в обсуждении выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

НАУЧНАЯ ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1297-1323

100 лет: фотоупругость — ЛИН МИСИ – МГСУ

Вадим Николаевич Савостьянов, Людмила Юрьевна Фриштер

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Столетняя история МИСИ – МГСУ — это и история возникновения, расцвета мощной экспериментальной школы мирового уровня, направленность исследований которой «Развитие и применение в исследованиях напряженного состояния строительных и специальных сооружений метода фотоупругости». Метод фотоупругости, позволяющий, наряду с аналитическими методами механики, производить континуальное исследование напряженного состояния объекта, является экспериментальным методом, эффективно применяемым как самостоятельно, так и совместно с численными методами. Цель и задачи исследования — привести обзор развития метода фотоупругости ретроспективно и, в частности, в ЛИН МИСИ; показать современное состояние метода с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости решения задач механики, исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций и сооружений.

Материалы и методы. Объект рассмотрения — поляризационно-оптический метод или метод фотоупругости: развитие, задачи, методы решения задач механики и исследования конструкций, применение.

Результаты. Приводятся примеры решения актуальных задач методом фотоупругости: анализ напряженного состояния в зоне углового выреза границы области, задача о напряженном состоянии при действии вынужденных деформаций в зоне контакта блока и основания, исследование напряженного состояния подземного туннеля ГЭС, плотина которой возводится методом направленного взрыва.

Выводы. Развитие экспериментальной механики деформируемых твердых тел характеризуется сближением экспериментальных и численно-аналитических методов исследования. Физическое моделирование, в частности поляризационно-оптический метод, позволяет получать НДС конструкций или решение задач механики, что возможно применить для оценки или корректировки результатов расчета, поэтому поляризационно-оптический метод актуален и имеет практическую значимость. Развитие механики деформируемого твердого тела определяет значимость физического моделирования, включая применение поляризационно-оптического метода. Достоинство поляризационно-оптического метода — континуальность решения задач механики, особенно значимо при рассмотрении локальных областей с особенностями НДС. Современные технологии изучения свойств материалов, создание новых материалов ведут к созданию новых моделей механики, для оценки достоверности которых необходимы методы физического моделирования, в частности поляризационно-оптический метод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод фотоупругости, возможности и применение метода фотоупругости, примеры моделирования задач механики, лаборатория исследования напряжений

Благодарности. Сотрудники лаборатории исследования напряжений (ЛИН) МИСИ им. В.В. Куйбышева с большой благодарностью за внимание и помощь, оказанную при организации ЛИН МИСИ, вспоминают профессора, доктора технических наук Федора Федоровича Губина; профессора, доктора технических наук Николая Антоновича Стрельчука; сотрудников Института машиноведения АН СССР профессора, доктора технических наук Николая Иосифовича Пригоровского, Нину Александровну Забугину.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Савостьянов В.Н., Фриштер Л.Ю. 100 лет: фотоупругость — ЛИН МИСИ – МГСУ // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1297–1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1297-1323

Автор, ответственный за переписку: Людмила Юрьевна Фриштер, FrishterLY@mgsu.ru.

100-years' story of success: photoelasticity — LSR–MICE – MSUCE

Vadim N. Savostyanov, Lyudmila Yu. Frishter

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

ABSTRACT

Introduction. The 100-years' history of MICE – MSUCE is also a history of establishment and flourishing of one of the world's most powerful experimental school of development and application of the photoelasticity method in the investigation of the stress state of civil and special structures. Reliable forecast of the stress state of buildings and structures under static, thermal and dynamic impacts is an indispensable prerequisite of safe operation provision of civil structures during the construction and the operation. The photoelasticity method, allows, along with the analytical methods of the mechanical science, for continual study of the stress state of the object under test, being an experimental method efficiently used both in "standalone" mode and in conjunction with numerical methods. The goal and the objectives hereof: a retrospective development review of the photoelasticity method, in particular, of the contribution of LSR of MICE, and the assessment of the contemporary state of the method in terms of its actuality, novelty and practical significance of mechanical problem solutions, of stress-strain state studies of structures and buildings.

Materials and methods. The subject hereof is the polarized light method or the photoelasticity method: development, problematics, solution methods of mechanical problems and studies of structures, applications.

Results. The paper describes solution examples of vital problems by the photoelasticity method: stress analysis in the wedge-shaped notch zone of the area boundary, stress state problem under forced deformation in the block-basement contact area, stress state study of underground hydropower plant tunnel with the weir erected by pinpoint blasting. The performed analysis of the photoelasticity method and its contemporary level illustrates the opportunities provided by the method in solving of mechanical problems and in structural studies.

Conclusions. Is the experimental school of the photoelasticity method of LSR–MICE – MSUCE really the sunk Atlantis? The development of the experimental mechanics of deformable solid bodies is characterized by progressive proximity of experimental and numerical analysis research methods. The physical modelling, in particular, the polarized light method, allows for obtaining stress-strain state diagrams of structures, or solutions of mechanical problems, feasible for assessment or for calculation result corrections, that is why the polarized light method retains actuality and practical significance. The development of the deformable solid body mechanics determines the significance of the physical modelling, including the polarized light method. The benefit of the polarized light method is the continuity of mechanical problem solutions which is especially important when local areas with specific features of the stress strain behaviour are considered. Modern technologies of material property studies, invention of new materials lead to creation of new mechanical models, for adequacy assessment of which physical modelling methods are required, in particular, the polarized light method.

KEYWORDS: photoelasticity method, development review of photoelasticity method, opportunities and application of photoelasticity method, modelling examples of mechanical problems, stress-strain state, stress concentration, Laboratory of stress research, experimental school of photoelasticity method

Acknowledgments. Employees of the Stress Research Laboratory (LIN) of the Moscow Civil Engineering Institute named after V.V. Kuibysheva, with great gratitude for the attention and assistance rendered in the organization of LIN Moscow Civil Engineering Institute named after V.V. Kuibysheva, they remember Professor, Doctor of Technical Sciences Fedor Fedorovich Gubin; Professor, Doctor of Technical Sciences Nikolai Antonovich Strelchuk; employees of the Institute of Mechanical Engineering of the Academy of Sciences of the USSR, Professor, Doctor of Technical Sciences Nikolai Iosifovich Prigorovskiy, Nina Aleksandrovna Zabugina.

FOR CITATION: Savostyanov V.N., Frishter L.Yu. 100-years' story of success: photoelasticity – LSR–MICE – MSUCE. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1297-1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1297-1323 (rus.).

Corresponding author: Lyudmila Yu. Frishter, FrishterLY@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В предисловии фундаментальной работы М. Фрохта [1] 1936 г. отмечается, что «огромное большинство аварий машин имеет причиной неправильную конструкцию, что получается в связи с применением при расчете формул для среднего распределения напряжений, не учитывающих действительного распределения напряжений и особенно наличия концентрации напряжений». М. Фрохт писал [1], что «наиболее напряженная область... является ахиллесовой пятой всей конструкции. Конструктору необходимо свое внимание сосредоточить на действительных местных напряжениях и не доверять обманчивым значениям средних или номинальных напряжений». Что изменилось за 100 лет в требованиях к исследованию конструкций?

Надежное прогнозирование напряженного состояния сооружений и конструкций под действием статических, температурных и динамических воздействий — неперенное условие обеспечения безо-

пасной работы сооружений в период строительства и эксплуатации. Метод фотоупругости, позволяющий, наряду с аналитическими методами механики, производить континуальное исследование напряженного состояния объекта, — это экспериментальный метод, эффективно применяемый как самостоятельно, так и совместно с численными методами.

К числу бесспорных преимуществ метода фотоупругости относится возможность: исследования сложнейших конструктивных форм с полным соблюдением геометрического подобия, воспроизведения граничных условий, полностью адекватных натуре, воспроизведения нагрузочных факторов с учетом особенностей воздействия их сочетаний во времени.

Наиболее актуальные направления развития метода, позволяющие расширить границы его использования:

- разработка методов моделирования, представляющих возможность оценить влияние различия упругих постоянных материалов модели и натуре,

и учесть проявление реологических свойств конструкционных материалов;

- создание способов воспроизведения в моделях нагрузочных факторов, в числе которых температурные деформации, действие объемных сил, величина и направление которых являются функциями координат, динамические нагрузки, моделирующие волновые и сейсмические воздействия, действие вынужденных деформаций, имеющих конечный разрыв по поверхности контакта составных областей;

- разработка техники измерений и обработки оптической информации;

- получение на модели метода фотоупругости напряженно-деформированного состояния (НДС), имеющего особенности, например, обусловленные геометрией и разрывом вынужденных деформаций, зон концентрации напряжений.

Сегодня численные методы решения задач механики — основные, с их помощью проводят исследования для различных вариантов конструкций, их параметров. Информационные технологии, создание численных комплексов расчета, разработки в области численных методов расчета снизили конкурентоспособность методов экспериментальной механики.

Применение мощных программных комплексов (ПК) ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, ЛИПА, SKAD и пр., реализующих метод конечных элементов, позволило создать такие расчетные модели объектов, исследования которых проведены на основе установления соответствия экспериментальных данных и результатов численного решения модельной краевой задачи.

ПК для расчета конструкций — это готовое решение определенной системы численного анализа. Поэтому ПК определяются применяемыми математическими моделями, которые в рамках тех или иных допущений описывают физические модели процесса. Метод фотоупругости или поляризационно-оптический метод — метод физического моделирования НДС конструкций, при создании подобной модели дает возможность получить НДС исходного объекта.

Предмет рассмотрения — метод фотоупругости: развитие, анализ возможностей для решения задач механики сегодня на примере работ, выполненных в основном в лаборатории исследования напряжений (ЛИН) МИСИ – МГСУ.

Цель и задачи исследования: провести обзор развития метода фотоупругости ретроспективно и современное состояние метода с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости решения задач механики, изучения НДС конструкций и сооружений.

Приводятся отдельные результаты актуальных исследований напряженного состояния конструкций и сооружений, проведенных в ЛИН МИСИ и Институте экспериментальной механики Московского государственного строительного университета; результаты решений задач, отражающих возможности

и особенности метода фотоупругости, а также задач, обусловленных методическими вопросами метода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод фотоупругости: развитие, задачи, методы решения, применение

Метод фотоупругости: ретроспектива, задачи, методы решения, применение. История развития метода фотоупругости. Обзор литературы

История развития метода фотоупругости или поляризационно-оптического метода, начиная с момента открытия явления двойного лучепреломления в нагруженных стеклянных образцах в 1816 г. до 1990 г., а также подробные ссылки на литературу приведены в трехтомнике по фотоупругости ЛИН [2], в работах [3, 4].

Главные достижения отдельных периодов развития метода фотоупругости отражены в исследованиях метода. Приведем трактаты и книги, показывающие ключевые направления развития метода фотоупругости. В монументальном трактате Э. Кокера и Файлона (E.G. Coker и L.N.G. Filon) [5], вышедшем в 1931 г., рассматривается развитие метода для решения плоской задачи упругости.

Основы метода «размораживания» изложены в публикациях Г. Опделя (1936), А. Куске (1938), В.М. Краснова (1939–1944). В фундаментальном двухтомнике М. Фрохта «Фотоупругость» [1] (т. 1. 1941, т. 2. 1948) дано полное и исчерпывающее состояние метода статической фотоупругости. Приведенные в работе М. Фрохта примеры не потеряли своей актуальности сегодня.

В трудах Н.И. Пригоровского, Г.С. Варданяна (1961–1962) разрабатывается метод размораживания свободных температурных деформаций, предусматривающий предварительное «замораживание» деформаций в элементах модели и последующее «размораживание» всей модели, получивший в дальнейшем широкое применение и развитие для решения методических и инженерных задач [6–9].

В 1961 г. выходит книга под редакцией Н.И. Пригоровского «Напряжения и деформации в деталях и узлах машин» [10], обобщающая результаты исследований методом фотоупругости.

В 1970-х годах изданы труды А. Дюрелли, Райли [11], Р.И. Хаимова – Малькова [12], сборники материалов Всесоюзных конференций «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений» [13].

Результаты исследований лаборатории Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта обобщены А.Я. Александровым, М.Х. Ахметзяновым в «Поляризационно-оптических методах механики деформируемого тела» (1973) [3].

Трехтомное издание по методу фотоупругости под редакцией профессора Г.Л. Хесина [2] вышло в 1975 г.: т. 1 «Решение задач статики сооружений.

Метод оптически чувствительных покрытий. Оптически чувствительные материалы», т. 2 «Метод поляризационно-оптических измерений. Динамическая фотоупругость», т. 3 «Моделирование ползучести. Исследование температурных напряжений». В трехтомнике отражены результаты исследований НДС конструкций и сооружений, полученные в работах ЛИН МИСИ, сформулированы основные подходы и направления развития метода.

Изданы — в Таллинне в 1975 г. монография Х.К. Абена «Интегральная фотоупругость» [14], в Киеве в 1981 г. под редакцией Б.С. Касаткина «Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений» [15].

Ежегодно выпускаются сборники трудов научных работ, выполненных в лабораториях институтов, включая ЛИН МИСИ. В Таллинне проходят Всесоюзные конференции по методу фотоупругости: VII — в 1971 г. [16], VIII — в 1979 г. [17], публикуются работы [18–26].

Двухтомник Дж.Ф. Белла «Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел» [27] издан в 1984 г. Завершает этот плодотворный период развития метода фотоупругости выход в 1990 г. двухтомного фундаментального труда «Экспериментальная механика» под редакцией А. Кобаяси (Япония) [28].

Эпоха великих строек энергетического комплекса СССР, особенно гидротехнических сооружений, обусловила развитие методов физического моделирования. В МИСИ им. В.В. Куйбышева была создана лаборатория исследования напряжений. Развитие метода экспериментального решения задач механики, расширение круга задач механики, исследование сложных конструкций и сооружений сформировали научную школу, основным направлением исследований которой стало «Развитие и применение в исследованиях напряженного состояния строительных и специальных сооружений метода фотоупругости». Возглавлял ЛИН профессор, доктор технических наук, лауреат Государственной премии СССР Г.Л. Хесин. В ЛИН МИСИ сформировался круг единомышленников, высоко квалифицированных специалистов в области экспериментальной механики.

По разработанным в лаборатории методам и методикам проведены исследования НДС практически всех важнейших и уникальных гидротехнических сооружений СССР и некоторых зарубежных объектов: Братской ГЭС, Усть-Илимской ГЭС, Красноярской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, Мамаканской ГЭС, Саратовской ГЭС, Нижнекамской ГЭС, Чебоксарской ГЭС, Плявиньской ГЭС, Ингурской ГЭС, Токтогульской ГЭС, Нурекской ГЭС, Рогунской ГЭС, Андиганского и Кировского гидроузлов, Днестровской ГЭС, Днепрогэс-II, Колымской ГЭС, Кислогубской ПЭС, плотины Сяньмынь (КНР), Иранской ГЭС, гидроузла Хаобинь (Вьетнам), Асуанской ГЭС (Египет), плотины Лас-Мерседес (Куба), ГЭС «Таб-

ка» (Сирия), ГЭС «Стратос» (Греция), гидроузла «Тери» (Индия); конструкций Нововоронежской и Смоленской АЭС, корпусов и защитных оболочек ядерных реакторов из преднапряженного железобетона для АЭС и АТЭЦ; подземных сооружений под действием горного давления, сейсмике и направленных взрывов (селезащитная плотина Медео и плотина Камбаратинской ГЭС); многих промышленных, гражданских и машиностроительных конструкций; ледостойких платформ нефтедобычи в условиях морского шельфа; конструкций вертолетов, элементов силовых двигательных установок.

Коллективом ЛИН создан ряд уникальных по своим исследовательским возможностям установок. В содружестве с Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова и Загорским оптико-механическим заводом разработан ряд приборов для поляризационно-голографических измерений, предназначенных как для исследовательских, так и учебных целей (совместно с ВСНПО «Союзчприбор»). Многоимпульсная установка для изучения волн напряжений не имеет аналогов и позволяет фиксировать поля напряжений для трех моментов времени при однократном импульсном воздействии на объект [29, 30].

Задачи, методы решения, применение

Отдельные разделы механики деформируемых сред: теория упругости, теория ползучести, теория пластичности, термоупругость, волновая механика (волны напряжений в твердых телах), механика разрушения и другие приобретают статус самостоятельных дисциплин. Поэтому развитие фотоупругости происходит в зависимости от поставленных задач в нескольких направлениях: статическая фотоупругость, фотоползучесть, фотопластичность, термофотоупругость, динамическая фотоупругость.

Одновременно развивается методика исследований: метод рассеянного света, метод «размораживания», метод оптически чувствительных покрытий, радиационная фотоупругость, объемная фотоупругость и др.

Выдвигаемые практикой задачи требовали разработки фундаментальных вопросов моделирования и техники эксперимента. Впервые в отечественной практике лабораторией разработаны методы решения задач волновой динамики, стационарной и нестационарной термоупругости. Обоснована возможность и разработана техника экспериментального изучения реологических процессов.

Моделирование задач механики методом фотоупругости определило ряд методических вопросов, рассмотрение которых стало самостоятельной задачей исследований. Ниже рассматриваются следующие вопросы: влияние коэффициента Пуассона на решение задачи упругости, воспроизведение объемных сил, моделирование кусочно-однородных задач теории упругости, моделирование НДС гидротехниче-

ских сооружений при воздействии динамических нагрузок, получение полей изоклин, картин полос быстропротекающих процессов, воздействие длинных сейсмозрывных волн на напряженное состояние подземных сооружений на примере туннеля Камбаринской ГЭС, плотина которой возводится методом направленного взрыва.

Влияние коэффициента Пуассона на решение задачи теории упругости

Точное моделирование НДС конструкций в общем случае возможно при соблюдении равенства коэффициентов Пуассона материалов модели и натуре. Однако конструкционные материалы (бетон $\nu_H = 0,16–0,20$, сталь $\nu_H = 0,30–0,33$) отличаются от модельного, оптически чувствительного полимера в высокоэластическом состоянии ($\nu_M = 0,5$) и в стеклообразном состоянии ($\nu_M = 0,35$).

Из рассмотрения разрешающей системы уравнений задачи теории упругости следуют соотношения [31]:

$$\sigma_{ij}(\nu_H) = \sigma_{ij}(\nu_M) + \sigma_{ij}^A(\nu_H), \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}(\nu_H) = \frac{1 + \nu_M}{1 + \nu_H} [\sigma_{ij}(\nu_M) + \sigma_{ij}^A(\nu_H)]. \quad (2)$$

Соотношение (1) применимо при действии объемных поверхностных сил, соотношение (2) — при действии вынужденных деформаций: температурных, усадочных и т.д.

Здесь $\sigma_{ij}^A(\nu_H)$ — напряжения в натурной конструкции при действии вынужденных деформаций вида:

$$\xi_i^A = \frac{\nu_M - \nu_H}{(1 + \nu_M)E} S_i(\nu_H), \quad (3)$$

$$S_i = \sum_1^3 \sigma_{ij}.$$

Зависимости (1) и (2) раскрывают механический смысл влияния неравенства коэффициентов Пуассона на величины и распределение напряжений, но в практическом применении не удобны, так как требуют определения напряжений от вынужденных деформаций (3) в натурной конструкции.

Учитывая, что дополнительное решение формально соответствует решению термоупругой задачи, применимы зависимости, осуществляющие переход от модели к натуре для этого случая

$$\sigma_{ij}^A(\nu_H) = \Omega \sigma_{ij}^A(\nu_M), \quad (4)$$

где $\Omega = 1$ для плоского напряженного состояния.

$\Omega = \frac{1 - \nu_M}{1 - \nu_H}$ — для плоской деформации и объемного напряженного состояния.

Подстановкой (4) в (1) и (2) и учетом обычных форм подобия получаются формулы перехода от модели к натуре, учитывающие неравенство $\nu_M \neq \nu_H$.

$$\sigma_{ij}(\nu_H) = K [\sigma_{ij}(\nu_M) + \Omega \sigma_{ij}^A(\nu_M)], \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}(\nu_H) = K \frac{1 + \nu_M}{1 - \nu_H} [\bar{\sigma}_{ij}(\nu_M) + \Omega \sigma_{ij}^A(\nu_M)], \quad (6)$$

где $K = \frac{P_H l_M^2}{P_M l_H^2}$ — при действии поверхностных на-

грузок; $K = \frac{\gamma_H l_H}{\gamma_M l_M}$ — при действии объемных сил

на тела с массой γ_i ; $K = \frac{\alpha_H T_H E_H}{\alpha_M T_M E_M}$ — при действии температурного поля T_i .

Предложенные зависимости позволяют произвести переход от модели к натуре с учетом влияния неравенства $\nu_M \neq \nu_H$ с использованием дополнительного испытания одной модели под действием вынужденных деформаций вида (5).

Воспроизведение объемных сил

Для воспроизведения в моделях действия объемных сил, величина которых и направления зависят от координат, предложено воспользоваться доказанной аналогией между НДС, вызванным действием поверхностных сил P_i , вынужденных деформаций ξ и НДС от действия переменных объемных сил F_i [26].

Система уравнений и граничных условий искомого решения имеет вид:

$$U_{i,j}^{(F)} + U_{j,i}^{(F)} + 2S_{ii}^{(F)} + \frac{F_i}{G} = 0, \quad (7)$$

$$2G \left[0,5 \left(U_{i,j}^{(F)} + U_{j,i}^{(F)} \right) + \delta_{ij} S_{ii}^{(F)} \right] n_j = 0. \quad (8)$$

Система уравнений и граничных условий заменяющих нагрузок

$$\left. \begin{aligned} U_{i,j}^{(P,\xi)} + U_{j,i}^{(P,\xi)} + 2S_{ii}^{(P,\xi)} &= 0 \\ 2G \left[0,5 \left(U_{i,j}^{(P,\xi)} + U_{j,i}^{(P,\xi)} \right) + \delta_{ij} S_{ii}^{(P,\xi)} \right] n_j &= P_i \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Условие тождественного равенства $U_i^{(F)} \equiv U_i^{(P,\xi)}$ имеет вид:

$$\frac{E}{1 - 2\nu} \xi_i, \quad i = -F_i, \quad (10)$$

$$\frac{E}{1 - 2\nu} \xi_i n_i + P_i = 0. \quad (11)$$

Из выражений (10) и (11) следует, что условием применимости данной аналогии является потенциальность объемных сил F_i в объеме тела и непрерывность потенциала на его поверхности.

В представленном виде аналогия может быть использована для моделирования действия объемных сил, вызываемых потенциальными полями типа фильтрационного и взвешивающего давления, элек-

тростатических магнитных полей, центробежных ускорений и т.д. В работе [32] экспериментально с применением данной аналогии проведено исследование напряженного состояния гравитационной плиты при действии взвешивающего и фильтрационного давления. Результат убедительно доказывает необходимость уточненного, по сравнению с нормативными методами, определения влияния данных нагрузочных факторов.

Моделирование кусочно-однородных задач теории упругости

Моделирование кусочно-однородных задач теории упругости связано с потребностью создания оптически чувствительных полимеров, механические свойства которых менялись бы в соответствии с заданным их соотношением.

Предлагаемый метод экспериментального решения задачи, не требующей создания разномодульных материалов, позволяет получить решение кусочно-однородной задачи с помощью суммы решений на моделях из стандартного оптически чувствительного полимера.

Рассматривается тело V , составленное из материалов с различными модулями упругости E_l и коэффициентами Пуассона в частях тела $V_l (l = 1, 2)$.

Напряженное состояние составного тела σ_{ij} представимо в виде ряда решений для однородного тела, получаемых экспериментально, с помощью моделей из стандартного оптически чувствительного (E, ν) материала [25].

$$\sigma_{ij} = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_{ij}^{(n)}, \quad (12)$$

где σ_{ij} — решение исходной кусочно-однородной задачи от действия заданных поверхностных и объемных сил, а также температурных деформаций; $\sigma_{ij}^{(n)}$ — решение однородной задачи при тех же условиях закрепления. При $n = 0$, $\sigma_{ij}^{(0)}$ — напряжения в однородном теле от заданных воздействий. При $n = 1, 2, \dots$ $\sigma_{ij}^{(n)}$ — решение однородной задачи при действии вынужденных деформаций $\xi^{(n-1)}$ вида:

$$\xi_{ij}^{(n-1)} = K_l \varepsilon_{ij}^{(T)} - \sum_{P=1}^n K_l^P \varepsilon_{ij}^{(n-P)} + \delta_{ij} \frac{m_l}{E} \sum_{P=1}^n K_l^{n-1} S^{(n-P)}, \quad (13)$$

$$K_l = 1 - \frac{(1 + \nu_l)E}{(1 + \nu)E_l}, \quad m_l = \frac{(\nu - \nu_l)E}{(1 + \nu)E_l},$$

где $l = 1 (i, j \in \nu_1); l = 2 (i, j \in \nu_2)$.

Экспериментальное решение задачи осуществляется с помощью однотипного методического приема. Область V_2 с «замороженными» деформациями $\xi_{ij}^{(n-1)}$ отделяется от модели $n - 1$ и склеивается с областью V_1 , свободной от напряжений. После «размораживания» в модели реализуется напряженное состояние, соответствующее n -й задаче.

В труде [33] показано, что ряд решений, соответствующих второму слагаемому выражения (13), мажорируется геометрической прогрессией, и его сумму следует искать, используя рекуррентные соотношения, выполняемые с заданной точностью. Учитывая, что предлагаемый способ рассчитан на использование моделей из оптически чувствительного материала, задаваемая точность определения суммы не должна превосходить точности метода фотоупругости, что достигается при испытании 3–4 моделей.

Решение задач, соответствующих первому и третьему слагаемым выражения (13), получается как в задаче с использованием методики «размораживания» свободных температурных деформаций, причем в данном случае результат требуемой точности выходит на основании исследований одной модели (первое слагаемое) и 2–3 моделей (второе слагаемое).

В качестве примера применения предложенной методики рассматривается прямоугольный блок, скрепленный с полупространством. На рис. 1 приводится чертеж блока и вид исследуемого температурного распределения $T = T(z)$. Принимается, что модули упругости блока V_1 и основания V_2 различны, причем $E_1 \leq E_2, \nu_1 = \nu_2$.

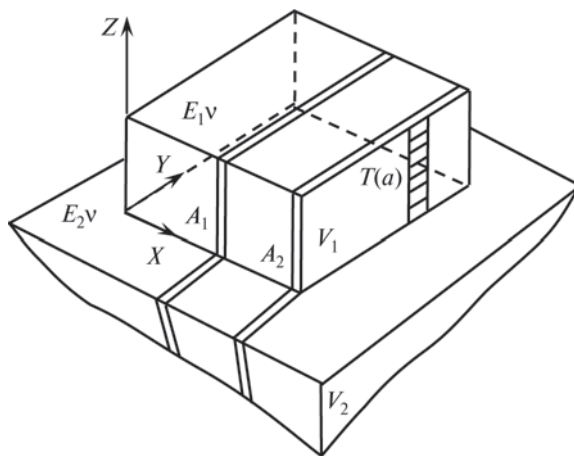


Рис. 1. Модель остывающего блока на основании в виде полупространства

Fig. 1. Model of cooling block on basement as half-space

В этом случае:

$$K_1 = m_1 = m_2 = 0, \quad K = K_2 = 1 - \frac{E_1}{E_2}.$$

Искомые напряжения получаются из рассмотрения решений для деформации (13):

$$\sigma_{ij} = \frac{1 - K}{1 - K + K^2 C} \tilde{\sigma}_{ij}^{(0)} + \frac{K}{1 - K + K^2 C} \tilde{\sigma}_{ij}^{(1)}, \quad (14)$$

$$C \sigma_{ij}^{(n-1)} = \tilde{\sigma}_{ij}^{(n)} - \tilde{\sigma}_{ij}^{(n+1)}.$$

На рис. 2 приведены картины полос в центральном срезе блока, полученные последовательным применением описанного выше приема. Особенностью

данной термоупругой задачи является то, что экспериментально определяются напряжения $\bar{\sigma}_{ij}^{(n)}$, созданные дисторсиями, равными соответственно $-\varepsilon_{ij}^{(0)}$, $-\varepsilon_{ij}^{(1)}$ и т.д. Составляющие зависимости (14) $\bar{\sigma}_{ij}^{(n)}$ вызваны дисторсиями, равными соответственно при $n = 1, \alpha T - \varepsilon_x^0$; $n = 2, \alpha T - \varepsilon_x^0 - \varepsilon_x^{(1)}$... и т.д. С учетом этого связь между $\bar{\sigma}_{ij}^{(n)}$ и $\bar{\sigma}_{ij}^{(n)}$ имеет вид: $\bar{\sigma}_{ij}^{(0)} = \bar{\sigma}_{ij}^{(0)}$; $\bar{\sigma}_{ij}^{(1)} = -\bar{\sigma}_{ij}^{(1)} + \bar{\sigma}_{ij}^{(0)}$; $\bar{\sigma}_{ij}^{(2)} = \bar{\sigma}_{ij}^{(2)} - \bar{\sigma}_{ij}^{(1)} + \bar{\sigma}_{ij}^{(0)}$.

На рис. 3 показаны зависимости изменения напряжений в зоне примыкания блока к основанию для различных соотношений E_1/E_2 .

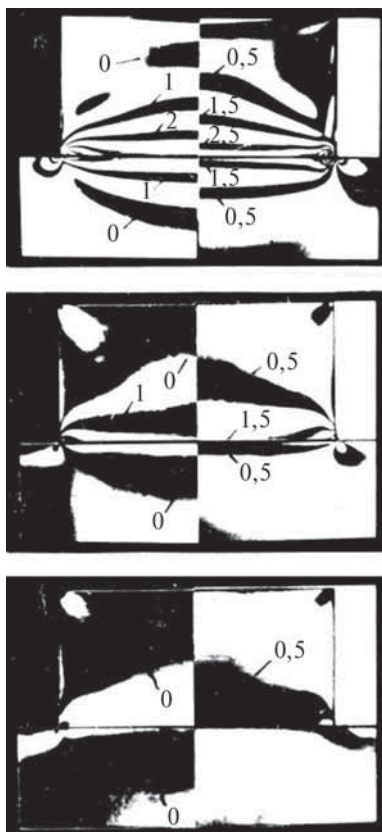


Рис. 2. Картины полос «m» в среднем сечении блока для трех решений ряда однородных задач

Fig. 2. Fringe patterns “m” in the medial section of the block for three solutions of a range of uniform tasks

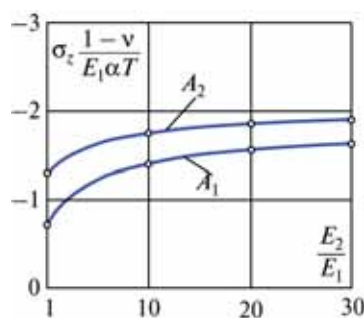


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений в зоне контакта блока и основания от величины E_1/E_2

Fig. 3. Dependence of maximum stress in block-basement contact area versus E_1/E_2 magnitude

Важное преимущество предлагаемого экспериментального метода — возможность решения кусочно-однородной задачи в широком диапазоне изменения отношения E_1/E_2 на основании одной серии моделей.

Моделирование напряженно-деформированного состояния гидротехнического сооружения при воздействии динамических нагрузок

Моделирование НДС гидротехнических сооружений при воздействии динамических нагрузок, таких как сейсмические и сейсмозрывные волны, требует рассмотрения полной системы уравнений НДС динамической задачи, позволяющей методом нормализации получить необходимые и достаточные критерии подобия [2].

Учет влияния вязкоупругих свойств натуральных материалов ведет к необходимости соблюдения дополнительных критериев подобия, которых в случае применимости экспоненциального ядра с одним временем релаксации и равными для натуре и модели коэффициентами Пуассона — два, один из которых накладывает ограничение на масштаб геометрического подобия.

Поскольку свойства материала натуре, как правило, известны, а выбор модельных материалов, особенно оптически чувствительных, ограничен, требования подобия существенно ограничивают круг задач, решаемых в рамках строгого подобия.

Выход из данного затруднения получен при рассмотрении влияния отдельных параметров ядра. Показано, что отклонение от оптимальной аппроксимации функции релаксации всего на 10 % дает возможность изменить масштаб геометрического подобия практически на порядок. Это обстоятельство существенно расширяет возможности моделирования вязкоупругой динамической задачи на маломасштабных моделях [34].

Для исследования оптических и механических свойств вязкоупругих модельных материалов при импульсном нагружении создана экспериментальная установка, одновременно регистрирующая оптические и механические величины при взрыве микрозаряда ВВ на конце тонкого стержня из модельного материала. Основная сложность состояла в регистрации импульса напряжений $\sigma(t)$, так как не существует приборов, позволяющих это делать при столь малых временах, поэтому для определения оптических $m(t)$, механических $\sigma(t)$ и $\varepsilon(t)$ величин было предложено использовать модернизированные составные стержни Гопкинсона [35]. В отличие от применяющихся ранее схем составного стержня Гопкинсона, в качестве измерительных элементов предложено использовать не металлические стержни, а стержни из оптически чувствительного материала ЭД6-МА, для которого напряжения и деформации при импульсном нагружении определяются через оптическую разность хода по закону Вертгейма с по-

стоянными коэффициентами, определенными динамической тарировкой. Оптическая разность хода $m(t)$ и продольное смещение $u(t)$ регистрируются поляризационно-динамической установкой на базе высокоскоростной камеры, работающей в режиме фоторегистратора со скоростью 1500 м/с.

Напряжения $\sigma(t)$ в вязкоупругом материале определяются по картине полос $m(t)$ в мерном стержне на границе раздела, а $m(t)$, $\varepsilon_{prod}(t)$, $\varepsilon_{poper}(t)$ регистрируются непосредственно в образце из вязкоупругого материала. Продольные и поперечные деформации измеряются с помощью розетки из двух тензорезисторов с базой 1 мм, сигналы с которых регистрируются запоминающим осциллографом.

Для совмещения во времени изохром $m(t)$ смещений $u(t)$ и осциллограмм деформаций установки оборудованы системой метки времени.

Разработанная методика позволяет путем непосредственных измерений в ходе эксперимента получать импульсы напряжений $\sigma(t)$, деформаций $\varepsilon(t)$ и оптической разности хода $m(t)$ в вязкоупругом оптически чувствительном материале при действии динамических нагрузок.

Для выявления механических и оптических функций релаксации и ползучести, входящих в линейные реологические зависимости наследственного типа по экспериментально определенным импульсам, применяется методика численного решения интегральных уравнений Вольтерра первого рода с использованием метода регуляризации Тихонова [35]. В результате численного расчета на ЭВМ для нескольких сечений стержня устанавливаются графические зависимости для искомых реологических функций. Осредненное значение функций хорошо аппроксимируется экспоненциальными зависимостями с одним или двумя временами релаксации.

Влияние вязкоупругих свойств материала на распространение волн напряжений наглядно иллюстрируется на примере дифракции продольной волны на круглом отверстии в бесконечной среде. Показано, что максимальные коэффициенты концентрации за счет вязкоупругих свойств по сравнению с упругим распределением снижаются на 12–15 %.

Получение полей изоклин, картин полос быстропротекающих процессов

Традиционным для метода фотоупругости является получение в качестве исходной информации при исследовании модели полей изоклин и картин полос, обозначающих соответственно угол наклона главных площадок и величины максимального касательного напряжения.

Моделирование быстропротекающих процессов требует дополнительно к этой информации получить поле перемещения. В этом случае эффективно применение поляризационно-голографической интерферометрии, дающей возможность определения величин главных напряжений. Регистрируются картины изодром Δ_1 , Δ_2 на одной модели.

Особенность голографической регистрации в фотоупругости заключается в возможности одновременного получения соответствующей пары интерференционных картин, необходимых для определения главных напряжений.

Изодромы Δ_1 , Δ_2 связаны с главными напряжениями зависимостями:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= a\sigma_1 + b\sigma_2, \\ \Delta_2 &= a\sigma + b\sigma_2,\end{aligned}\quad (15)$$

где a , b — оптические постоянные материала, получаемые из тарировочного эксперимента.

В этом случае методом двух экспозиций (первая экспозиция — модель не нагружена, вторая — нагружена) регистрируются голографические интерферограммы изодром при двух ортогональных направлениях линейной поляризации, например, m_x , m_y . Каждая из этих интерферограмм содержит в общем случае напряженного состояния одновременно область полос абсолютной разности хода m_1 , m_2 , которые меняются местами на интерферограммах ортогонального направления поляризации, что позволяет установить величины главных напряжений по полю исследуемой модели.

Наиболее целесообразно применение поляризационно-голографической интерферометрии при исследовании волн напряжений (рис. 4).

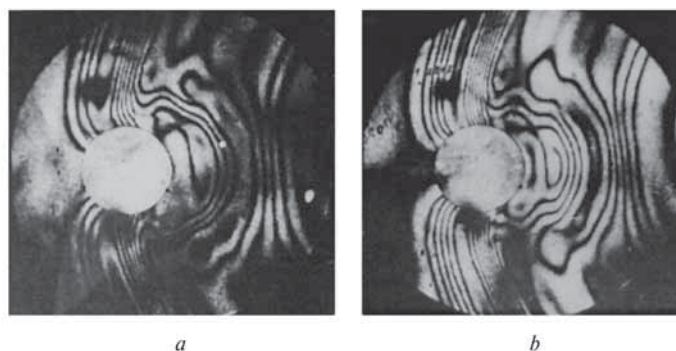


Рис. 4. Голографические взаимодействия продольной волны напряжений с круговым отверстием: a — изодромы M_x ; b — изодромы M_y

Fig. 4. Holographic interaction of longitudinal stress wave with circular hole: a — isodromic M_x ; b — isodromic M_y

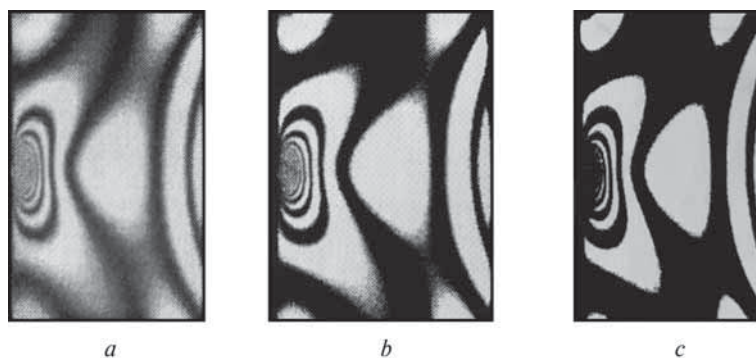


Рис. 5. Пример обработки интерферограмм с использованием видеокамеры и ЭВМ: *a* — полутоновые (введенные); *b* — контрастированные; *c* — бинарная картина изохром с использованием ЭВМ

Fig. 5. Processing example of interference diagram by means of a video camera and a PC: *a* — half-tone (inserted); *b* — contrasting; *c* — binary isochromatic pattern from PC

Важный момент в методе фотоупругости — регистрация и обработка экспериментальных данных, которая до широкого распространения персональных ЭВМ производилась в основном ручным способом. В автоматизации процессов измерений и обработки экспериментальных данных эффективно направление, основанное на вводе интерферограмм преимущественно с помощью видеотехники с экранов поляризационных установок в режиме реального времени (при статических исследованиях), либо фиксированных интерферограмм (ползучесть, интерферометрия, динамическая фотоупругость) [2] (рис. 5).

Специализированное программное обеспечение позволяет проводить в интерактивном режиме ввод и коррекцию изображения, цифровую обработку, расшифровку интерферограмм и определение величин напряжений, вывод информации на каждом этапе обработки.

Пример решения практической инженерной задачи

В качестве примера эффективного применения метода фотоупругости при решении практических задач гидротехнического строительства рассмотрим воздействие длинных сейсмозврывных волн на напряженное состояние подземных сооружений. Характерный случай — туннель Камбаратинской ГЭС, плотина которой возводится методом направленного взрыва. Туннель расположен вблизи свободной поверхности сложной конфигурации, подвергается воздействию дифрагированных относительно каньона продольных и поперечных волн напряжений, отраженных от свободной поверхности.

При такой сложной волновой картине компоненты напряженного состояния среды в зоне расположения выработок определяются экспериментально методом динамической фотоупругости и пересчитываются на натурные условия по зависимостям:

- для фазы сжатия продольной *P*-волны

$$\sigma_{2P}^H = \frac{m_P}{m_0} \frac{1 - \xi_1}{1 - \xi_1} \sigma_O^H, \quad (16)$$

$$\sigma_{1P}^H = \frac{m_P}{m_0} \frac{\xi_1 (1 - \xi_O)}{1 - \xi_1} \sigma_O^H; \quad (17)$$

- для фазы растяжения продольной *P*-волны

$$\sigma_{1P}^H = -\frac{m_P}{m_0} \frac{1 - \xi_O}{1 - \xi_1} \sigma_O^H, \quad (18)$$

$$\sigma_{2P}^H = -\frac{m_P}{m_0} \frac{\xi_2 (1 - \xi_O)}{1 - \xi_2} \sigma_O^H; \quad (19)$$

- для поперечной *S*-волны

$$\sigma_S^H = \pm \frac{m_P}{m_0} (1 - \xi_O) \frac{\sigma_O^H}{2}, \quad (20)$$

где σ_{2P}^H , σ_{1P}^H , σ_S^H — главные напряжения в зоне действия продольной и поперечной волн; m_P , m_S — полученный из эксперимента на моделях порядок полос в точках, соответствующих месту расположения выработок соответственно в зонах действия *P*- и *S*-волн; m_0 — максимальный порядок полос, полученный экспериментально при взрыве заряда в безграничной пластине в точках, соответствующих месту расположения выработок; ξ_O — отношение между главными напряжениями в фазе сжатия *P*-волны при взрыве заряда в безграничной пластине, определяемое по зависимостям работы [36]; ξ_1 , ξ_2 — отношение между главными напряжениями соответственно в фазах сжатия и растяжения *P*-волны в модели в исследуемой точке; σ_O^H — максимальное радиальное напряжение в натуре при взрыве заряда в безграничном массиве на сходственном расстоянии.

Разделение компонентов напряжений проведено с использованием картин абсолютных разностей хода, позволяющих определить отношения между главными напряжениями ξ_1 , ξ_2 в произвольной точке области в любой момент времени [37].

Для определения величины σ_O^H разработана специальная методика расчета параметров волн напряжений при взрыве зарядов сложной формы [38, 39],

так как использование известных теоретических решений для сферических зарядов, если заряды удлиненные, приводит к значительным погрешностям при расчете максимальных радиальных напряжений.

В основу методики положена расчетная схема, предложенная В.А. Боровиковым и И.Ф. Ваягиным, рассматривающая удлиненный заряд как систему сферических зарядов. Чтобы не выполнять каждый раз для каждого удлиненного заряда достаточно трудоемкие расчеты, в лаборатории были получены зависимости, позволяющие упростить вычисления по определению σ_O^H .

В результате обобщения многочисленных расчетных данных о волновых напряжениях в безграничной среде при взрыве удлиненных зарядов различной длины и веса получена зависимость:

$$\frac{Q}{Q_{ЭК}} = f\left(\frac{R}{L}\right), \quad (21)$$

где Q — вес удлиненного заряда; $Q_{ЭК}$ — вес сферического заряда, эквивалентного удлиненному, т.е. создающего на одном и том же расстоянии максимальные радиальные напряжения, такие же как при взрыве удлиненного заряда; R — расстояние от удлиненного заряда до рассматриваемой точки; L — длина заряда.

На основании зависимости (21) при известных весе и размерах удлиненных зарядов может быть получен вес эквивалентного сферического заряда, а затем выполнен расчет для одиночного сферического заряда и определена величина σ_O^H .

В одном из рассматриваемых вариантов Камбаратинской ГЭС № 2 предусмотрено возведение плотины с помощью направленных взрывом зарядов суммарным весом $Q = 11\,983$ т. Схема расположения

зарядов и основных сооружений гидроузла приведена на рис. 6.

Основной ($Q_O = 4685$ т; $L_O = 196$ м) и вспомогательный ($Q_B = 6190$ т; $L_B = 473$ м) заряды расположены на различных уровнях и взрываются с заданным замедлением, обеспечивающим их раздельное воздействие на основные сооружения гидроузла. На первом этапе исследований был проведен анализ напряженного состояния горного массива при взрыве указанных зарядов в безграничной среде, который позволил установить, что с точки зрения сейсмического действия взрыва в наиболее неблагоприятных условиях будут находиться водосбросный и водоотводные туннели по сечению 1-1 (см. рис. 6).

В безграничной среде в точках горного массива, соответствующих расположению водосбросного и водоотводных туннелей, способом, описанным выше, определена величина максимальных радиальных напряжений в натуре σ_O^H . Значения этих напряжений составили:

- для водосбросного туннеля — 5,2 МПа;
- для водоотводных туннелей — 4,6 МПа.

Длина фазы сжатия продольной волны, распространяющейся в массиве $\lambda_O^H = 112$ м.

Далее для выбранного наиболее опасного сечения 1-1 проведены экспериментальные исследования с целью установления всех модельных величин, входящих в выражения (16)–(20).

Исследования выполнялись на моделях из материала ЭД16-МА. Волновое воздействие осуществлялось с помощью взрыва микрозаряда азида свинца весом $W = 30$ мг. Длина фазы сжатия продольной волны при взрыве такого заряда в безграничной пластине $\lambda_O^H = 13$ мм. Модель была построена на основании соблюдения критерия Коши. Схема исследуе-

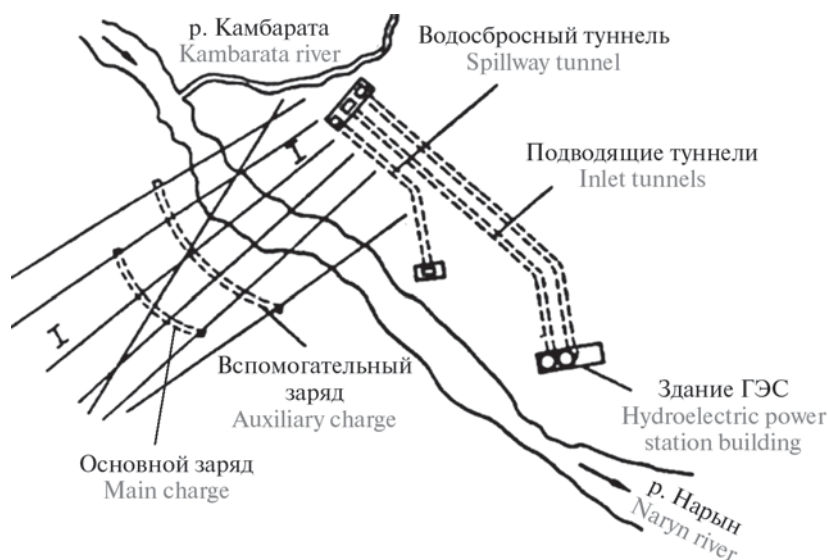


Рис. 6. План основных сооружений Камбаратинской ГЭС № 2 и расположение зарядов

Fig. 6. Layout of the main facilities of Kambaratinskaya HPP No. 2 and arrangement of charges

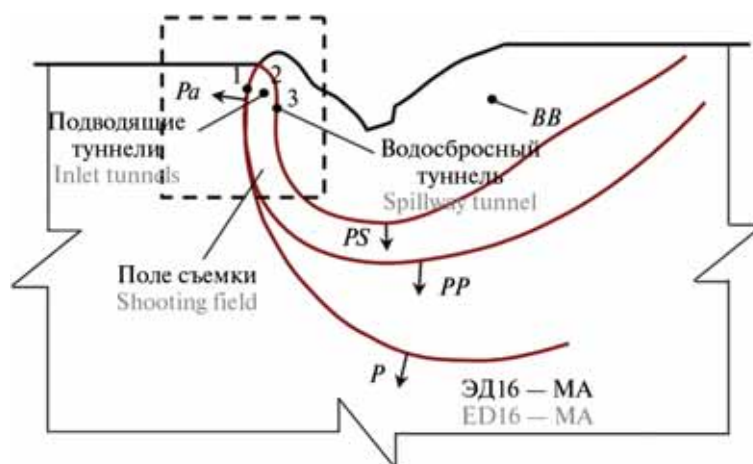


Рис. 7. Схема исследуемой модели Камбаратинской ГЭС

Fig. 7. Diagram of Kambaratinskaya HPP's model under study

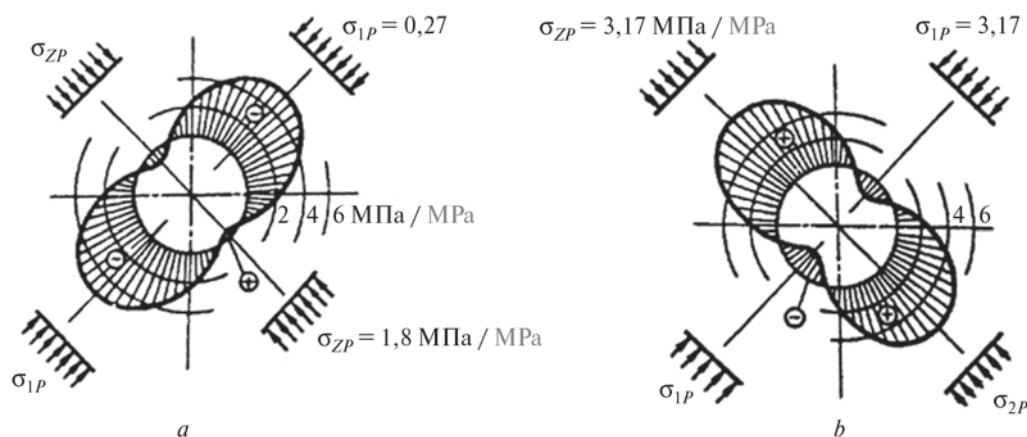


Рис. 8. Эпюры контурных напряжений в сечении водосбросного туннеля Камбаратинской ГЭС № 2 в момент времени, соответствующие возникновению максимальных сжимающих (а) и растягивающих (б) напряжений

Fig. 8. Load diagrams of contour stress in the section plane of the weir tunnel of Kambaratinskaya HPP No. 2 at moments of occurrence of maximum compression (a) and extension (b) stress

мой модели с указанием мест расположения туннелей (точки 1–3) и заряда представлена на рис. 7.

Анализ картин полос, полученных в модели каньона, позволил установить, что в первые моменты времени область расположения туннелей находится в зоне действия дифрагированной продольной волны P_d . В последующие моменты времени имеет место интерференция второй фазы P_d -волны с отраженными от свободной поверхности волнами. Наблюдается также изменение во времени направления падающего фронта волны. Установлены характерные моменты времени возникновения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в каждой из рассматриваемых точек и определены соответствующие этим моментам времени максимальные порядки полос в фазах сжатия и растяжения. В эти же мо-

менты установлены значения коэффициентов ξ_1 , ξ_2 для каждой из рассматриваемых точек.

Таким образом, получены все необходимые данные для определения основного напряженного состояния в зонах расположения водосборного и водотводных туннелей.

Как указывалось ранее, длина фазы сжатия продольной волны в массиве $\lambda_O^H = 112$ м, что значительно превышает размеры туннелей, диаметр d которых не более 10 м. При таких соотношениях λ_O^H/d для установления коэффициентов концентрации на отверстиях, как показано в работе [2], можно воспользоваться статическим решением.

На основании данных об основном напряженном состоянии и коэффициентах концентрации были построены эпюры контурных напряжений вокруг тун-

нелей. На рис. 8 даны эпюры контурных напряжений в сечении водосбросного туннеля.

Метод фотоупругости: настоящее, задачи, методы решения, применение

Обзор литературы

Современный этап развития фотоупругости (1990–2021 гг.) характеризуется значительным сокращением исследований и решаемых задач.

Многие работы последнего времени относятся к исследованию локального НДС, к расшивке и интерпретации экспериментальных данных. Результаты исследований методом фотоупругости за последние годы опубликованы в работах авторов [40–71].

В трудах Г.З. Шарафутдинова изучаются вопросы, относящиеся к явлению двойного лучепреломления [41, 42]. Рассматриваются основы поляризационно-оптических методов исследования конечных и больших деформаций. Определены условия, при которых нелинейная задача сводится к последовательности геометрически линейных задач.

Методу замораживания в нелинейной фотоупругости посвящены публикации Г.З. Шарафутдинова, Ю.В. Эльберта [42]. В качестве оптически чувствительного материала использован полиметилметакрилат, определены его оптико-механические свойства. Методика выявления порядков полос в модели иллюстрируется на задаче о растяжении пластины со свободным круговым отверстием.

В работе А.П. Шабанова [43] изучается методика определения параметров двулучепреломления в полярископе с белым источником света. Оптическая разность хода определяется расчетным путем как результат решения соответствующих уравнений. Л.А. Краснов [44] исследует вопросы цветности изохром в фотоупругости.

В публикациях М.Х. Ахметзянова, В.М. Тихомирова, П.Г. Суровина [45] отмечается, что методы определения коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) основаны на анализе НДС у вершины трещины: аналитическом, численном, экспериментальном. Для повышения точности расчета применяют аппроксимацию поля напряжений, которая учитывает дальнейшее поле напряжений. Указывается [46], что такой подход для расчета КИН позволяет использовать данные на некотором удалении от сингулярной зоны, т.е. вершины трещины или надреза, который моделируется экспериментально.

Для определения КИН (В.М. Тихомиров) [47, 48] используются экспериментальные данные, полученные методом рассеянного света. Поле напряжений аппроксимируется решением Нейбера о растяжении осесимметричного тела с гиперболическим вырезом. Предложенная методика определения КИН корректно учитывает стеснение деформаций в вершине острого надреза и распределение напряжений в несингу-

лярной зоне, где на асимптотическое решение оказывает влияние дальнейшее поле напряжений.

Н.Г. Албаут, В.Н. Барышников, М.В. Табанюхова, Н.В. Харинова [49–51] применяют методы нелинейной фотоупругости для исследования больших упругих деформаций при растяжении резиновых пластин и полос с надрезами и трещинами, наклоненными под разными углами к горизонтальной оси.

В.П. Нетребко [51] предлагает расчетно-экспериментальный метод определения КИН возле трещины в композитной пластине при двухосном нагружении по данным поляризационно-оптических измерений. Выражения для напряжений, построенные согласно несингулярным уравнениям ортотропной механики трещин [51], справедливы в окрестности кончика трещины $r < 2c$ и даны в виде степенных рядов по $r < 2c$, где r — радиус-вектор, проведенный из вершины трещины; $2c$ — диаметр трещины, при этом сингулярные уравнения справедливы в окрестности $r \ll c$. Отмечается, что расширение окрестности для сбора информации облегчает проведение поляризационно-оптических измерений и повышает точность определения КИН. Издаются работы [52–56].

В последнее время, хотя и наблюдается значительное сокращение числа работ по методу фотоупругости, выходят сборники, книги, монографии [57–62] и др. В 2004 г. издана книга А.С. Кошеленко, Г.Г. Поздняка «Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении» [61], предназначенная для студентов и аспирантов (РУДН), приведены исследования концентрации напряжений в элементах конструкций машин. Выходят юбилейные сборники ИМАШ РАН к 100-летию со дня рождения Н.И. Пригорского [59], ЛИИ к 70-летию со дня рождения Г.Л. Хесина [57, 58] и И.Х. Костина [60].

Современное состояние и перспективы развития поляризационно-оптических методов применительно к исследованию фундаментальных задач и задач инженерной практики системно проанализированы в монографии И.А. Разумовского [62], вызвавшей значительный интерес и переведенной на несколько иностранных языков. Автор [62] отмечает следующее:

- исследование НДС в области существенной неоднородности сводится к комплексному анализу: экспериментальному, численному, аналитическому, что позволяет привести взаимные оценки результатов, полученных разными подходами или совокупностью подходов;
- для изучения напряжений в области источника локальной концентрации напряжений экспериментальные данные определяются на некотором от него удалении, т.е. удалении от зоны сингулярного решения. Расширение окрестности для сбора экспериментальных данных облегчает поляризационно-оптические измерения и повышает точность их измерения.

Методы исследования остаточных напряжений [63–66] иллюстрируются на примерах оценки остаточных напряжений в гильзе двигателя внутреннего сгорания, в биметаллической обечайке корпуса реактора.

Анализ методов исследования напряжений в композитных конструкциях приведен в работе Б.Н. Ушакова [52], рассмотрен метод замораживаемых клеек, который применен для изучения напряжений пневматических легковых и грузовых шин.

А.В. Фомин рассматривает общий подход к решению обратной задачи интегральной фотоупругости для унитарных сред, позволяющий на основе экспериментальных данных оптических измерений определять параметр напряженного состояния вдоль луча просвечивания. Вопрос о разрешимости обратных задач [67], как некорректных задач, решается на основе физических соображений, т.е. свойств напряженного состояния фотоупругой среды, которое реализуется на моделях, и априорной информации о свойствах искомого решения. В публикациях отмечается сближение экспериментальных методов исследования с расчетно-теоретическими в области решения обратных задач. Такое сочетание методов обеспечивает объективную оценку уровня НДС в недоступных для прямых измерений зонах.

Представляет интерес [25, 34] использование поляризационно-оптических методов для определения напряжений от заданных несовместностей или заданных вынужденных деформаций (дисторсий) и, в частности, температурных, не удовлетворяющих условиям совместности, что приводит к возникновению напряжений. В работах [69–72] рассматривается наиболее сложное НДС конструкций в зоне концентрации напряжений, обусловленной как формой границы или «геометрическим фактором», так и конечным разрывом заданных вынужденных деформаций, механических свойств, выходящим на поверхность контакта элементов конструкций.

В докторской работе С.Л. Соколова на тему «Расчетно-экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния и циклической долговечности пневматических шин» экспериментальные данные метода фотоупругости применены для оценки результатов численного моделирования. Разрабатывается метод численного моделирования НДС пневматических шин, и для его верификации, например, выбора типа конечных элементов, полученных значений напряжений и деформаций, привлекаются данные метода фотоупругости. Причем применены экспериментальные данные, полученные ранее методом клеек в работах С.Б. Ушакова, Е.И. Тартакова, И.П. Фролова задолго до того, как опубликованы основные результаты диссертации.

В кандидатской диссертации А.С. Чернытина «Определение параметров напряженно-деформированного состояния на основе минимизации расхож-

дения расчетных и экспериментальных данных», выполненной в институте машиноведения им. А.А. Благонравова, применены программные комплексы (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS). Расчетные модели объектов созданы на основе установления соответствия экспериментальных данных поляризационно-оптического метода и результатов численного решения модельной краевой задачи [56, 58].

Предмет изучения докторской диссертации «Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния составных конструкций в зонах концентрации напряжений», выполненной в МГСУ, — НДС зоны концентрации напряжений, обусловленной действием разрывных вынужденных деформаций и конструктивной неоднородностью формы границы. НДС в зоне концентрации напряжений получено на моделях метода фотоупругости.

Области особенностей решения задачи механики и, прежде всего, зоны геометрической нелинейности при наглядности и информативности данных модели всегда будут преимущественным предметом исследования методом фотоупругости.

Ниже рассматриваются задачи исследований локального НДС в составной области существенной конструктивной неоднородности. НДС в зоне составной области в окрестности нерегулярной точки границы получается на полимерной модели. Современные способы визуализации материалов эксперимента в сочетании с численными и аналитическими методами изменяют возможности и применение метода фотоупругости. Приводится анализ возможностей получения методом фотоупругости и размораживания деформаций напряженного состояния в области, максимально приближенной к области концентрации напряжений при цифровой съемке и обработке данных, стандартными способами разделения напряжений. Представлено исследование локального НДС в области углового выреза границы. При этом для анализа, помимо НДС модели метода фотоупругости, используются данные эксперимента в классической работе М. Фрохта [1].

Локальное напряженно-деформированное состояние в составной области существенной конструктивной неоднородности

Вопросам поведения решений уравнений Лапласа, Пуассона и эллиптических уравнений для областей с негладкими границами посвящены труды В.А. Кондратьева [73], В.В. Фуфаева, М.Л. Уильямса, Я.С. Уфлянда, А.И. Каландии, Г.П. Черепанова [74], Д.Б. Боджи, О.К. Аксентян [75], К.С. Чобаняна [76], И.Т. Денисюка [77], В.Д. Кулиева [78], В.З. Партон [79] и др.

В фундаментальной работе В.А. Кондратьева [73] доказано, что в окрестности нерегулярных точек границы области решение общей эллиптической краевой задачи представляется в виде асимптотическо-

го ряда и бесконечно дифференцируемой функции. Слагаемые этого ряда содержат решения однородных краевых задач для модельных областей: клина или конуса. Эти решения зависят от локальных характеристик — величины телесного или плоского угла и типа краевых условий, механических характеристик для кусочно-однородных тел. Величины коэффициентов разложения решения в окрестности особой точки неизвестны и зависят от задачи в целом. Методы установления указанных коэффициентов разложения сложны и труднодоступны при практическом определении напряжений составных конструкций, имеющих сложную форму границы.

И.Т. Денисюк приводит асимптотику упругого решения для плоской составной области с угловыми точками на линиях раздела [77]. Достоинством фундаментального исследования сингулярного решения краевой задачи в работах В.Д. Кулиева [66, 78] является возможность применения его результатов для изучения задач об остаточных напряжениях и распространении трещины через границу соединений разнородных материалов. Показано [62, 66], что порядок сингулярности напряжений зависит от степени приближения вершины трещины к области стыка разномодульных материалов.

В публикациях М.Л. Вильямса, на которые ссылаются многие авторы, напряжения, деформации, функция напряжений Эри вблизи вершины сектора с прямолинейными сторонами имеют степенной вид. В трудах А.И. Каландии, К.С. Чобаяна, Л.А. Багирова, О.К. Аксентян, Г.П. Черепанова [74], В.П. Нетребко, В.З. Партон [79], Н.А. Махутова [80], Ю.Г. Матвиенко [81] и других решение однородной краевой задачи в окрестности нерегулярной точки границы рассматривается в степенном виде.

Для исследования НДС в окрестности нерегулярной точки на особой линии границы упругого тела вводится локальная криволинейная система координат, в которой записываются уравнения Ламе [75, 76]. При приближении к нерегулярной точке границы внутри области решение упругой задачи сводится к решению двух однородных плоских задач: плоской деформации и антиплоской деформации или поперечного сдвига.

Возможно показать, что представление решения упругой задачи в окрестности нерегулярной точки на особой линии границы в виде двух однородных плоских задач справедливо в случае, если: а) заданные вынужденные деформации, объемные силы непрерывны по области упругого тела; б) заданные вынужденные деформации, объемные силы — кусочно-непрерывные функции, причем скачок значений вынужденных деформаций, объемных сил по внутренней поверхности контакта областей выходит на особую линию границы тела; в) поверхность контакта областей V_1 и V_2 упругого составного тела V , имеющих различные механические характеристики E_i , ν_i , $i = 1, 2$, соответственно выходит на особую

линию границы тела. В случае в) решение упругой задачи в окрестности нерегулярной точки границы сводится к двум плоским задачам для составного тела.

Для изучения решения упругой задачи в перемещениях в окрестности нерегулярной точки на особой линии границы области применяется теория подобия [55, 74].

Рассматривается малая окрестность нерегулярной точки на особой линии — линии разрыва, например, граничных условий или первых производных функций поверхности области. В малой окрестности нерегулярной точки границы поверхности применяется группа подобия: $x_1 = tx$; $y_1 = ty$; $z_1 = z$; $t > 0$, где t — параметр группы [55, 72]. Записывая уравнение Ламе в малой окрестности точки на особой линии и переходя к пределу при $t \rightarrow +\infty$, решение упругой задачи сводится к решению двух однородных плоских задач: плоской деформации и антиплоской деформации.

В работе [74] вводится понятие канонической сингулярной задачи, характеризующей особенность НДС в окрестности нерегулярной точки границы, для которой приводятся следующие две теоремы.

Любой канонической сингулярной задаче соответствует трансцендентное уравнение, каждому корню которого отвечает однородное решение, число произвольных действительных постоянных в этом решении равно кратности корня. В бесконечно малой окрестности особой точки решение корректной краевой задачи теории упругости ведет себя как асимптотически наибольшая по абсолютной величине собственная функция соответствующей канонической сингулярной задачи.

Аналитические решения задач упругости в зоне нерегулярной точки, линии границы области характеризуются сингулярностью решения, обусловленной идеализацией формы границы.

Теоретические и экспериментальные исследования концентрации напряжений, обусловленной формой границы, отражены в трудах Г. Нейбера, Р. Петерсона, Н.Г. Савина и В.И. Тульчиня, Б.Н. Ушакова, И.П. Фомина, Н.А. Махутова [70, 80], В.В. Васильева, В.П. Нетребко, Ю.Г. Матвиенко [81] и др.

Замораживание деформаций в заготовках и последующий отжиг — размораживание составной полимерной модели позволяют получить методом фотоупругости НДС в модели, соответствующее искомому [2, 3, 6–10]. Преимущество метода замораживания в том, что не требуется воспроизведения температурного поля в модели, используется стандартное оборудование для проведения эксперимента, и моделируется НДС конструкций со сложной формой границ (геометрическая концентрация).

Метод размораживания практически универсален и рекомендован при решении плоской задачи теории упругости, а также некоторых случаев объемной задачи, характерных наличием ограничений

для температурных воздействий. Для частного случая, когда температурные деформации в одном из направлений не вызывают напряжений, решены многие задачи инженерной практики: исследование термонапряженного состояния конструктивных элементов ядерных реакторов, энергетического оборудования, в сварных и резьбовых соединениях, конструкциях, имеющих зоны концентрации, в задачах машиностроения, гидротехники и др. [2, 3, 6–10].

Моделирование задач с вынужденными деформациями общего вида, не удовлетворяющими условиям совместности, рассматривается в исследованиях Г.С. Варданяна, Н.И. Пригоровского, С.Е. Бугаенко [21, 22], М.Н. Двереса, Б.Н. Евстратова [23], И.А. Разумовского [62], В.Н. Бронова, Е.М. Швеса, В.Н. Савостьянова, Л.Ю. Фриштер [24, 25] и др.

Недостаток метода размораживания, связанный с невозможностью моделировать объемные деформации на моделях из-за несжимаемости материала в высокоэластическом состоянии, преодолен в работах С.Е. Бугаенко, Н.И. Пригоровского, М.Н. Двереса, Б.Н. Евстратова, В.Н. Савостьянова, Д.И. Омельченко и рассматривается в настоящей статье.

Картина полос, полученная на модели методом фотоупругости и размораживания деформаций, в области концентрации напряжений отличается значительными градиентами экспериментальных данных: порядков полос (изохром), параметров изоклин, напряжений, деформаций. Ниже приводятся оценки

возможности получения методом размораживания вынужденных деформаций напряженного состояния в области углового выреза границы при действии разрывных вынужденных (температурных) деформаций с использованием визуализации экспериментальных данных при цифровой съемке и обработке и стандартных способов разделения напряжений, разработанных в методе фотоупругости [1–5, 9–13].

Оценка возможностей получения методом фотоупругости и размораживания деформаций напряженного состояния в области концентрации напряжений при цифровой съемке и обработке данных стандартными способами разделения напряжений

Рассматривается экспериментальное решение методом размораживания деформаций [2, 71] упругой задачи с вынужденными деформациями для плоской области на примере модели составной балки длиной 180 мм, шириной 24 мм.

В одной из областей балки Ω_2 созданы температурные деформации $\alpha T \delta_{ij}$, а другая область Ω_1 — не нагружена. Скачок температурных деформаций по поверхности контакта областей выходит в нерегулярную точку т. $O(0,0)$ границы — вершину выреза области.

Экспериментальное решение анализируется в окрестности вершины выреза границы балок, торцы которых имеют различные углы раствора: а) прямого

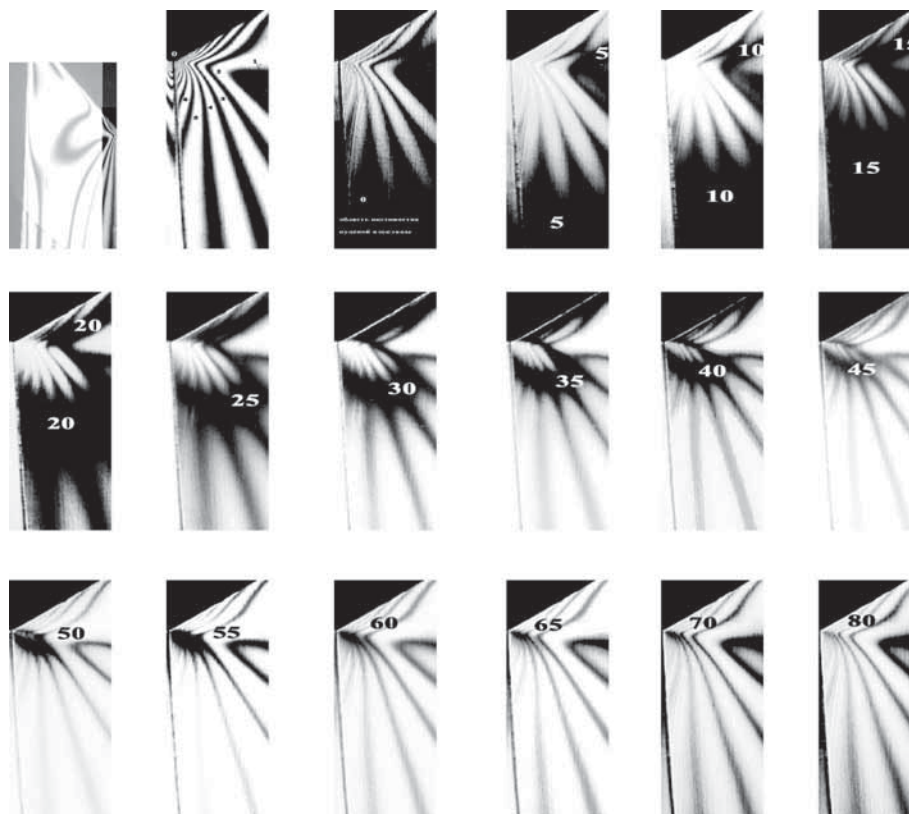


Рис. 9. Каталог экспериментальных данных для выбранного фрагмента области торца балки раствором

Рис. 9. Catalog of experimental data for the selected fragments of the beam end area with mortar

$2\alpha = 180^\circ$; б) «срезанного» прямого торца $\alpha + \beta = 180^\circ$, $\alpha = 105^\circ$, $\beta = 75^\circ$; в) торца с симметричным углом выреза $2\alpha = 260^\circ$.

Используя подробные экспериментальные данные, полученные при цифровой съемке, возможно фрагментировать область торца балки таким образом, что применимы стандартные способы разделения напряжений метода фотоупругости [1–4, 6, 71]: графический и метод разности касательных напряжений в области, максимально приближенной к области концентрации напряжений.

Выбирая различные фрагменты области балки, построены картины изостат в целом в области торца балки и картины изостат в области, прилегающей к области концентрации напряжений.

Для примера на рис. 9 приведен каталог экспериментальных данных для выбранного фрагмента области Ω_2 торца балки раствора $2\alpha = 260^\circ$.

Для выбранного фрагмента области торца балки на рис. 10 показаны экспериментальные данные: а) картина полос; б) совмещенная картина полос и изоклин.

По данным рис. 10 для выбранного фрагмента области графическим методом построены изостаты. По экспериментальным материалам (рис. 10) методом разности касательных напряжений построены эпюры напряжений в нескольких вертикальных сечениях балки, достаточно близко расположенных к области концентрации напряжений. Вспомогательные сечения I, II, III, IV параллельны оси OX и отстоят от нее на расстоянии y_i/h , равном соответственно: I — 0,02; II — 0,05; III — 0,008; IV — 0,11, $h = 24$ мм. Методом разности касательных напряжений получены напряжения в средних сечениях I–II, II–III, III–IV, которые отстоят от оси OX на расстоянии, равном соответственно: $y_{I-II} = 0,035h = 0,84$ мм, $y_{II-III} = 0,065h = 1,6$ мм, $y_{III-IV} = 0,1h = 2,4$ мм, $h = 24$ мм.

Результат разделения напряжений показывает [71], что во всех рассмотренных сечениях балок с различными углами выреза границы наблюдаются точки, в которых $\sigma_1 = -\sigma_2$, а площадки, наклоненные под углом 45° к главным, находятся в условиях чистого сдвига:

$$\tau_{\max} = \sigma_1; \sigma_i = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = 0.$$

Точки, в которых отмечаются площадки «чистого сдвига», располагаются в вершинах острых углов изохром и их окрестностях. Результат разделения напряжений демонстрирует, что линия, соединяющая вершины острых углов изохром, выходящая в вершину выреза т. О(0,0) на границе области, является линией «чистого сдвига», в каждой точке которой наблюдаются площадки чистого сдвига.

Полученные результаты разделения напряжений показывают, что современные возможности визуализации экспериментальных данных при цифровой съемке и их обработке, применение стандартных

методов разделения напряжений позволяют получить напряженное состояние в окрестности, прилегающей к области концентрации напряжений, что расширяет возможности метода фотоупругости по анализу экспериментального решения. Для области сингулярного решения задачи теории упругости (концентрации напряжений), в которой картины полос не читаются ни при каком увеличении фрагмента области, необходима разработка метода, позволяющего экстраполировать уверенные данные эксперимента на область концентрации напряжений.

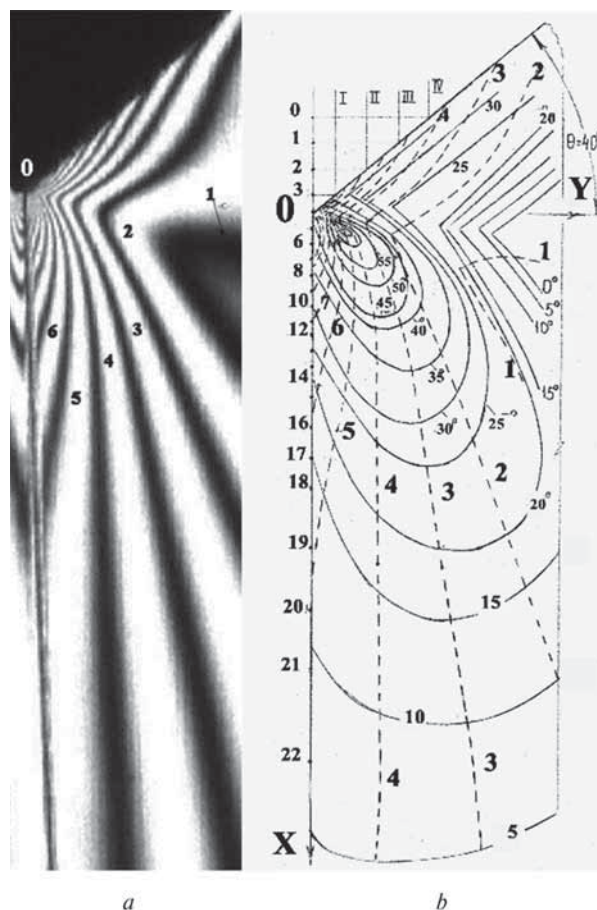


Рис. 10. Исходные данные для фрагмента области торца балки с раствором $2\alpha = 260^\circ$: а — картина изохром; б — совмещенная картина изохром и изоклин θ через 5°

Fig. 10. Initial data for the fragment of the beam face area with mortar $2\alpha = 260^\circ$: а — isochromatic pattern; б — combined isochromatic and isoclinic pattern θ via 5°

Исследование локального напряженно-деформированного состояния в области углового выреза границы

Рассматривается плоская задача теории упругости в окрестности нерегулярной точки границы [8–14, 69, 72], в которую выходит линия контакта областей со скачком значений вынужденных деформаций.

Однородное или кусочно-однородное тело, находящееся в плоском напряженном состоянии, име-

ет на границе угловую точку. По границе контакта $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ областей Ω_1 и Ω_2 , составляющих упругое тело, вынужденные деформации, объемные силы имеют скачок (конечный разрыв) вида:

$$\Delta \epsilon_{ij}^B = \epsilon_{ij}^B|_{\Gamma_2} - \epsilon_{ij}^B|_{\Gamma_1}; \Delta F_i = F_i|_{\Gamma_2} - F_i|_{\Gamma_1}; i, j = x, y.$$

Модули упругости, коэффициенты Пуассона, коэффициенты линейного расширения областей Ω_1 и Ω_2 постоянны и различны: $E_1, \nu_1, \alpha_1, i, j \in \Omega_1$ и $E_2, \nu_2, \alpha_2, i, j \in \Omega_2$ соответственно. Граничные условия в окрестности нерегулярной точки $O(0,0)$ на границе L_0 однородны.

Рассмотрим малую окрестность нерегулярной точки $O(0,0)$ части B упругого тела: $x^2 + y^2 < \epsilon_1^2, z < \epsilon_0$, ϵ_1, ϵ_0 — положительные малые числа.

Применяем группу подобия:

$$x_1 = tx; y_1 = ty; z_1 = z,$$

$$\sigma_{ij} = t\bar{\sigma}_{ij}; \epsilon_{ij} = t\bar{\epsilon}_{ij}; U_i = \bar{U}_i.$$

Разрешающая система уравнений плоской задачи теории упругости в новых переменных в этой окрестности перепишется:

$$\sum_{j1} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial j1} + \frac{1}{t^2} F_j = 0, \quad (22)$$

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial j1} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial i1}, \quad i, j \in \Omega_1, \Omega_2,$$

$$\sum_{j1} \bar{\sigma}_{ij} n_{j1}|_{L_0} = 0; \sum_{j1} \bar{\sigma}_{ij} n_{j1}|_{\Gamma B} = \frac{1}{t} \sigma_{in}^B|_{\Gamma B}, \quad (23)$$

$$\bar{\sigma}_{in}|_{\Gamma_1} = \bar{\sigma}_{in}|_{\Gamma_2}; \bar{U}_i|_{\Gamma_1} = \bar{U}_i|_{\Gamma_2}, \quad (24)$$

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{E_k} \left[(1 + \nu_k) \bar{\sigma}_{ij} - \nu_k \bar{S} \bar{\delta}_{ij} \right] + \frac{1}{t} \epsilon_{ij}^B + \frac{1}{t} \alpha_k T \bar{\delta}_{ij}, \quad (25)$$

где $k = 1, (x_1, y_1) \in \Omega_1; k = 2, (x_1, y_1) \in \Omega_2; j_1, i_1 = x_1, y_1, n_{j1} = n_j$ — нормаль к линии контакта областей $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, ΓB — граница области, содержащей окрестность $O_\delta(0)$ нерегулярной точки границы.

В зависимости от удаления или приближения к нерегулярной точке границы, что определяется изменением геометрического параметра t , вид разрешающей системы уравнений (1) в $O_\delta(0)$ меняется следующим образом.

а) При неограниченном возрастании геометрического параметра $t = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \rightarrow \infty, \epsilon_1 \ll \epsilon_2$ плоская за-

дача теории упругости кусочно-однородного тела ($E_k, \nu_k, \alpha_k, k = 1, 2$) с заданными нагрузками: вынужденными деформациями, температурными деформациями, объемными силами, в окрестности нерегулярной точки $O(0,0)$ границы приводится к однородной краевой задаче $\bar{\xi}^C = (\bar{\sigma}_{ij}^C, \bar{\epsilon}_{ij}^C, \bar{U}_i^C)$ для кусочно-однородно-

го тела с однородными граничными условиями (канонической, сингулярной).

Решение полученной однородной краевой задачи с однородными граничными условиями характеризует особенность НДС в нерегулярной точке $O(0,0)$ и ее окрестности, зависит от заданной формы границы, типа однородных граничных условий и значений механических характеристик материала ($E_k, \nu_k, k = 1, 2$). Нетривиальное решение полученной однородной задачи определяется как собственное решение.

б) При $t \rightarrow 1$ система уравнений (1) совпадает с исходной при действии заданных нагрузок. При $t \rightarrow 1$ НДС $\xi^H = (\sigma_{ij}^H, \epsilon_{ij}^H, U_i^H)$ обусловлено заданными нагрузками и граничными условиями.

в) В промежуточном диапазоне изменения значений параметра $t \in (1 + \alpha, H)$, где $N > 0$ — достаточно велико, $\alpha > 0$ — достаточно мало, действует как собственное НДС $\bar{\xi}^C$, так и НДС от заданных нагрузок $\bar{\xi}^H$ системы (1).

Согласно рассмотренным случаям изменения параметра t решение плоской задачи кусочно-однородного тела в окрестности нерегулярной точки границы можно представить в виде:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \bar{\sigma}_{ij}^C + \bar{\sigma}_{ij}^H, \bar{\epsilon}_{ij} = \bar{\epsilon}_{ij}^C + \bar{\epsilon}_{ij}^H, U_i = \bar{U}_i = \bar{U}_i^C + \bar{U}_i^H$$

или

$$\bar{\xi} = \bar{\xi}^C + \bar{\xi}^H,$$

где $\bar{\xi}^C = (\bar{\sigma}_{ij}^C, \bar{\epsilon}_{ij}^C, \bar{U}_i^C)$ — сингулярное (собственное) решение однородной краевой задачи, характеризующее особенность НДС в окрестности нерегулярной точки границы; $\bar{\xi}^H = (\bar{\sigma}_{ij}^H, \bar{\epsilon}_{ij}^H, \bar{U}_i^H)$ — решение системы (22)–(25), обусловленное влиянием действия заданных нагрузок следующего вида:

$$F_i^\Phi = \frac{1}{t^2} F_i, \sigma_{in}^\Phi|_{\Gamma B} = \frac{1}{t} \sigma_{in}^B|_{\Gamma B}, \epsilon_{ij}^\Phi = \frac{1}{t} \epsilon_{ij}^B + \frac{1}{t} \alpha_k T \bar{\delta}_{ij},$$

а также влиянием действия скачка вынужденных деформаций и объемных сил по линии контакта $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ областей Ω_1 и Ω_2 :

$$\Delta F_i^\Phi = \frac{1}{t^2} (F_i|_{\Gamma_2} - F_i|_{\Gamma_1}) = \frac{1}{t^2} \Delta F_i,$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^\Phi = \frac{1}{t} (\epsilon_{ij}^B|_{\Gamma_2} - \epsilon_{ij}^B|_{\Gamma_1}) = \frac{1}{t} \Delta \epsilon_{ij}^B,$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^{\Phi 1} = \frac{1}{t} (\alpha_2 T|_{\Gamma_2} - \alpha_1 T|_{\Gamma_1}) \bar{\delta}_{ij} = \frac{1}{t} \Delta \alpha T \bar{\delta}_{ij}.$$

Рассматривая соотношения между слагаемыми в представлении НДС: $\bar{\xi} = \bar{\xi}^C + \bar{\xi}^H$ в окрестности нерегулярной точки границы, можно выделить следующие характерные области действия НДС.

а) Существует такая окрестность нерегулярной точки границы плоской области, в которой справедливо сингулярное решение однородной краевой за-

дачи, характерное тем, что $\sigma_{ij} \rightarrow \sigma_{ij}^c$, $\sigma_{ij}^H \rightarrow 0$. Особенность собственных напряжений σ_{ij}^c (деформаций ε_{ij}^c) имеет степенной вид $r^{\text{Re}\lambda-1}$, $\lambda \in [0,05]$. Порядки полос в области концентратора напряжений на модели (области сингулярного решения) не читаются ни при каком увеличении окрестности нерегулярной точки.

б) Существует такая окрестность нерегулярной точки границы области, в которой $\sigma_{ij} \approx \sigma_{ij}^c$, $\sigma_{ij}^H \approx 0$ и справедлива несингулярная однородная упругая задача с тем же «собственным» значением $\min \text{Re } \lambda$, что и в сингулярной задаче. Область несингулярного решения не содержит окрестность сингулярного решения и саму нерегулярную точку, а примыкает к ней. При стремлении извне к границе области сингулярного решения напряжения деформации меняются непрерывно, их значения велики, но конечны. Порядки полос на модели, соответствующие несингулярной области решения, читаются за возможным исключением некоторых.

в) При достаточном удалении от нерегулярной точки границы существует такая область, в которой $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^H$, $\sigma_{ij}^c = 0$ и напряжения обусловлены заданными нагрузками (общим полем напряжений).

В области несингулярного решения однородной плоской упругой задачи возможно привести оценки, используя которые можно экстраполировать данные на сечения, близко расположенные к нерегулярной

точке границы, с учетом данных эксперимента и практической точности измерения методом фотоупругости.

Анализируя напряженное состояние в вершине прямоугольного клина на примере известного [1] экспериментального решения М. Фрохта (рис. 11), выбирая область несингулярного решения ($m = 7$), которая примыкает к области сингулярного решения, восстанавливается значение нагрузки. На основании этого делается вывод о возможности восстановления порядка полос в малой окрестности вершины клина согласно практической возможности экспериментального решения и точности метода фотоупругости в рамках линейно-упругой постановки. Заметим, что экспериментальные работы, приведенные в работе М. Фрохта [1], не потеряли значимости для решения задач механики.

Экспериментальное решение термоупругой задачи рассматривается для модели балки [72], в одной из областей которой созданы свободные температурные деформации $\alpha T \delta_{ij}$, а другая область свободна от нагрузок. Скачок вынужденных деформаций $\Delta \varepsilon_{ij} = \alpha T \delta_{ij}$ по линии контакта областей, составляющих модель, выходит в нерегулярную точку $O(0,0)$ границы прямого торца балки. Картина полос, полученная методом «размораживания» для одной из областей балки, приведена на рис. 12.

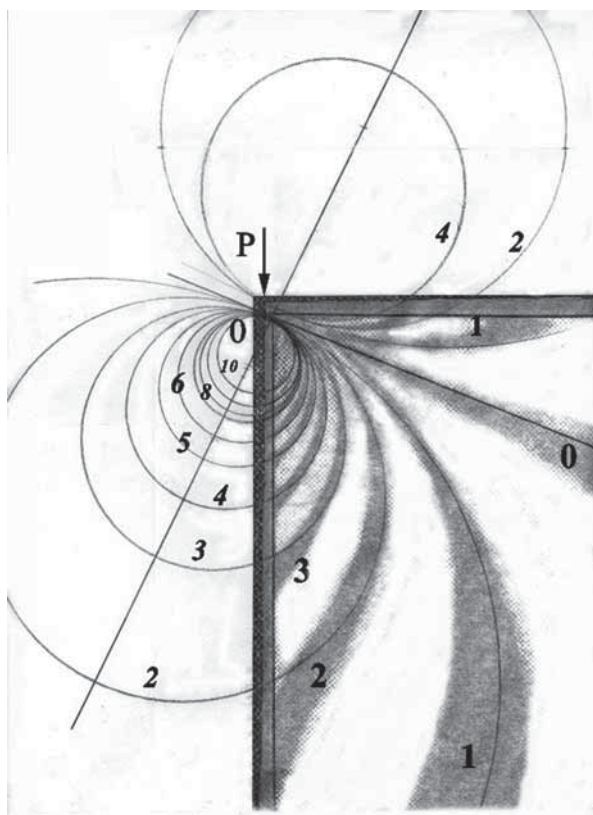


Рис. 11. Картина полос для прямого угла при действии сосредоточенной силы. Получена в работе М. Фрохта [1]

Fig. 11. Fringe pattern for right angle at concentrated force impact. Obtained during a study by M. Frokht [1]

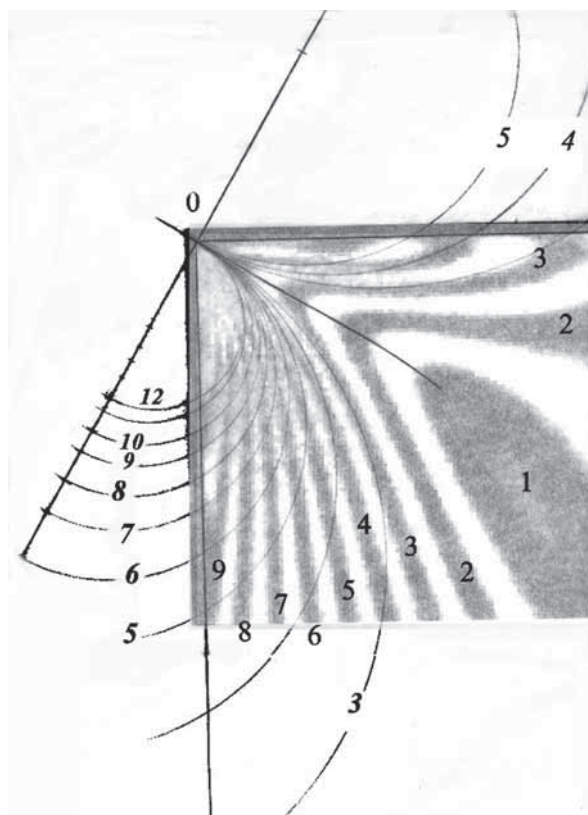


Рис. 12. Сопоставление теоретической и экспериментальной картин полос для области прямого торца балки

Fig. 12. Matching of the theoretical and the experimental fringe patterns for straight beam end area

Собственные напряжения в окрестности нерегулярной точки границы $O(0, 0)$ прямого торца балки имеют вид:

$$\sigma_r \equiv \frac{\alpha ET}{r} (c_1 \cos \theta + c_2 \sin \theta); \quad \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0.$$

Особенность собственных радиальных напряжений в области прямого торца балки (рис. 12) такая же, как и особенность радиальных напряжений для прямоугольного клина (рис. 11) под действием силы в задаче М. Фрохта: при $r \rightarrow 0$ $\sigma_r \sim \frac{1}{r} \rightarrow \infty$. Поэтому картина изохром (рис. 1), соответствующая радиальным напряжениям в экспериментальном решении М. Фрохта [1], является картиной собственных радиальных напряжений в окрестности нерегулярной границы прямого торца балки (рис. 12).

В области прямого торца балки построены эпюры порядков полос (изохром) для нескольких радиальных сечений, приведенные на рис. 13. Установлено подобие эпюр порядков полос [55, 69, 72]. По экспериментальным данным выбрано расчетное сечение в области несингулярного решения однородной задачи (г-г). Учитывая непрерывность и подобие изменения порядков полос в сечении (д-д), построены эпюры порядков изохром (рис. 13), а по ним и собственных радиальных напряжений (рис. 14). Сечение (д-д) располагается в области сингулярного решения, где картина полос не читается или «плохо» читается.

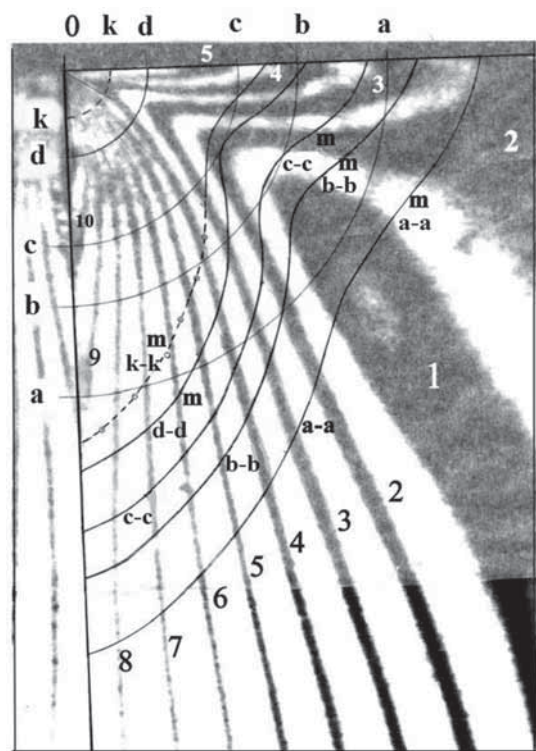


Рис. 13. Эпюры порядков полос по данным эксперимента. Сечение d-d — расчетное

Fig. 13. Load diagrams of fringe orders by experimental data. Section d-d — computed

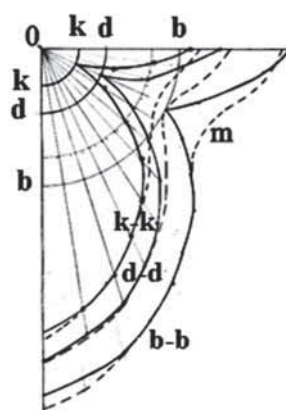


Рис. 14. Эпюры порядков полос и радиальных напряжений (пунктир) в области прямого торца балки
Fig. 14. Load diagrams of fringe orders and radial stress (dotted line) in the straight beam end area

Согласно теоретико-экспериментальному анализу напряженное состояние в окрестности нерегулярной точки границы плоской области, в которую выходит скачок вынужденных деформаций, предлагается следующая формула для экстраполяции экспериментальных данных:

$$m_{i+1} = \left(\frac{r_i}{r_{i+1}} \right)^{1-\lambda_0} m_i, \quad (26)$$

где m_i — порядки полос по данным эксперимента в расчетном сечении r_i в окрестности несингулярного решения однородной краевой задачи; m_{i+1} — порядки полос в сечении меньшего радиуса $r_{i+1} < r_i$, расположенного в области с нечитаемой или «плохо» читаемой картиной изохром модели; $\lambda_0 = \min \operatorname{Re} \lambda$ — минимальное значение действительной части комплексного корня характеристического уравнения однородной краевой задачи для модельного клина.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведен обзор развития метода фотоупругости. Рассмотрены ретроспектива и современное состояние метода с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости решения задач механики, исследования НДС конструкций и сооружений. Дан анализ возможностей и формулировка актуальных задач механики для решения методом фотоупругости. Представлены результаты решений задач, отражающих возможности и особенности метода фотоупругости, а также задач, обусловленных методическими вопросами метода.

Рассмотрены следующие вопросы: влияние коэффициента Пуассона на решение задачи упругости, воспроизведение объемных сил, моделирование кусочно-однородных задач теории упругости, моделирование НДС гидротехнических сооружений при воздействии динамических нагрузок, получение по-

лей изоклин, картин полос быстропротекающих процессов, воздействие длинных сейсмозрывных волн на напряженное состояние подземных сооружений на примере подземного туннеля ГЭС, плотина которой возводится методом направленного взрыва.

Проведен анализ возможностей получения методом фотоупругости и размораживания деформаций напряженного состояния в области, максимально приближенной к области концентрации напряжений при цифровой съемке и обработке данных, стандартными способами разделения напряжений. Показано исследование локального НДС в области углового выреза границы. При этом для анализа, помимо НДС модели метода фотоупругости, используются данные эксперимента из классической работы М. Фрохта [1].

Метод фотоупругости, позволяющий проводить континуальное исследование напряженного состояния объекта, наиболее эффективен для изучения локального НДС, имеющего особенность распределения, обусловленную геометрическим фактором, разрывом вынужденных деформаций или другими воздействиями, для исследования зон концентрации напряжений.

Метод фотоупругости, являющийся методом физического моделирования задач механики, актуален для анализа расчетных моделей объектов на основе установления соответствия экспериментальных данных поляризационно-оптического метода и результатов численного решения модельной краевой задачи, для оценки результатов численного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вопрос сопоставления конкурентоспособности метода фотоупругости, численных и аналитических методов исследования конструкций и сооружений не возникает. Общедоступность численных методов расчета, наличие большого числа программных комплексов расчета конструкций определяет их как основные. Массовость и доступность применения программных комплексов для расчета конструкций влечет необходимость оценки достоверности полученных результатов. Разные программные комплексы при заложенных в них одинаковых математических моделях ведут к одинаковым результатам.

Применяемые математические модели описывают физические модели процесса с теми или иными допущениями. Где истина? Физическое моделирование, в частности поляризационно-оптический метод, позволяет получать НДС конструкций или решение тестовых задач механики, что возможно применить для оценки или корректировки результатов расчета, поэтому поляризационно-оптический метод актуален и имеет практическую значимость.

Развитие механики деформируемого твердого тела определяет значимость физического моделирования, включая поляризационно-оптический метод. Метод фотоупругости, позволяющий, наряду с аналитическими методами механики производить континуальное исследование напряженного состояния объекта, служит экспериментальным методом, эффективно применяемым как самостоятельно, так и совместно с численными и аналитическими методами. Современное развитие экспериментальной механики деформируемых твердых тел характеризуется сближением экспериментальных и численно-аналитических методов исследования. Экспериментальные данные метода фотоупругости могут применяться для оценки результатов численного моделирования, для корректировки расчетных моделей объектов на основе установления соответствия экспериментальных данных поляризационно-оптического метода и результатов численного решения задачи, так как в программные комплексы заложены определенные математические модели и их решения. К числу бесспорных преимуществ метода фотоупругости относятся возможности: исследования сложнейших конструктивных форм с полным соблюдением геометрического подобия, воспроизведения граничных условий, полностью адекватных натуре, воспроизведения нагрузочных факторов с учетом особенностей воздействия их сочетаний во времени. Достоинство поляризационно-оптического метода — континуальность решения задач механики, особенно значимо при рассмотрении локальных областей с особенностями НДС. Современные технологии изучения свойств материалов, создания новых материалов ведут к созданию новых моделей механики, для оценки достоверности которых необходимы методы физического моделирования, в частности, поляризационно-оптический метод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фрохт М.М. Фотоупругость: поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М.-Л. : Гостехиздат, 1948–1950.
2. Метод фотоупругости. В 3-х томах / под ред. Г.Л. Хесина. М. : Стройиздат, 1975. Т. 1. С. 326, Т. 2. С. 311, Т. 3. С. 311.
3. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1974. 576 с.

4. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1966–1970 гг. М., 1970 (АН СССР Госниимашинovedения); за 1971–1978 гг. М., 1979. 267 с.
5. Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений. М. : ОНТИ, 1936.
6. Варданян Г.С. Экспериментальный метод определения температурных напряжений и их кон-

центрации // Изв. АН Арм. ССР. Сер. физ.-мат. наук. 1961. № 5.

7. Варданян Г.С., Пригоровский Н.И. Моделирование термоупругих напряжений в поляризационно-оптическом методе // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1962. № 4.

8. Пригоровский Н.И., Варданян Г.С. Определение температурных напряжений с применением «замораживания» и «размораживания» // Проблемы прочности в машиностроении. Вып. 8. Изд. АН СССР, 1962.

9. Исследование температурных напряжений / под ред. Н.И. Пригоровского. М.: Наука, 1972. 228 с.

10. Пригоровский Н.И. и др. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин. М.: Машгиз, 1961. 564 с.

11. Дюрелли А., Райли. Введение в фотомеханику: пер. с англ. / под ред. Н.И. Пригоровского. М.: Мир, 1970.

12. Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М.: Наука, 1970.

13. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений // Сб. тр. Всесоюзных конференций. Изд. ЛГУ, 1930, 1936, 1941, 1958, 1964. Таллинн, 1971.

14. Абена Х.К. Интегральная фотоупругость. Таллин: Валгус, 1975.

15. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченов Н.А. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. С. 385.

16. Труды VII Всесоюзной конференции по поляризационно-оптическому методу исследования напряжений. В 4-х томах. Таллин: АН ЭССР, 1971.

17. Материалы VIII Всесоюзной конференции по фотоупругости. В 4-х томах. Таллинн: АН ЭССР, 1979.

18. Хесин Г.Л., Долгополов В.В., Савостьянов В.Н. Исследование термонапряженного состояния бетонных блоков гидротехнических сооружений методом фотоупругости // Гидротехническое строительство. 1968. № 12. С. 12–15.

19. Розанов Н.С., Михайлова И.А. Исследование термонапряженного состояния строительных блоков // Изв. ВНИИГ. 1976. № 84. С. 85–11.

20. Ушаков Б.Н., Фролов И.П. Напряжения в композитных конструкциях. М.: Машиностроение, 1979.

21. Бугаенко С.Е. Моделирование напряжений от заданных несовместных деформаций поляризационно-оптическим методом // Изв. АН СССР. Мех. тверд. тела. 1980. № 4. С. 8–11.

22. Бугаенко С.Е. Об условиях на границах разрывов тензора дилатации или его производных // Изв. АН СССР. Мех. тверд. тела. 1979. № 1. С. 94–99.

23. Евстратов Б.Н., Пригоровский Н.И., Разумовский И.А. Исследование напряжений в пространственных конструкциях энергетического оборудования методом механического моделирования // Исследование напряжений в конструкциях. М., 1980. С. 56–66.

24. Vardanjan G.S., Frishter L.J. Modellierung thermoelastischer Spannungen in zusammengesetzten Konstruktionen // Spannungsoptische Untersuchungen. Beiträge (3). Bauakademie. DDR. Berlin, 1986.

25. Vardanjan G.S., Savosteanov V.N., Frishter L.J. The development photoelasticity method for solutions of piece-homogeneous elastic problems of solid mechanics // Proceeding SPIE the international Society for Optical Engineering. Photomechanics'95 Novosibirsk, 1995. С. 44.

26. Савостьянов В.Н., Агаханов Э.К. Об эквивалентности систем воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела // Развитие методов возведения, расчета и проектирования строительных конструкций. 1989. С. 12–13.

27. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, Часть I. Малые деформации. 600 с. Часть 2. Конечные деформации. 432 с.

28. Экспериментальная механика. В 2-х т.: пер. с англ. / под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. Т. 1. 615 с. Т. 2. 551 с.

29. Авт. свид. СССР № 1786370 А1 МПК G01, В9/021. Импульсная голографическая установка. 07.01.93. Бюл. № 1.

30. Авт. свид. СССР № 1796893 А1 МПК G01, В9/04. Импульсная голографическая установка. 23.02.93. Бюл. № 7.

31. Савостьянов В.Н., Омельченко Д.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния сооружений при различных коэффициентах Пуассона материалов модели и натуре // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 4.

32. Савостьянов В.Н., Агаханов Э.К. Моделирование взвешивающих и фильтрационных сил в методе фотоупругости // Гидротехническое строительство. Энергопрогресс. 1996. № 7. С. 8–10.

33. Савостьянов В.Н., Фриштер Л.Ю. Моделирование кусочно-однородной задачи механики деформированного твердого тела методом фотоупругости // Изв. АН. Механика твердого тела. 1993. № 6.

34. Костин И.Х., Дмоховский А.В., Двалишвили В.В. Критерии подобия при моделировании распространения волн напряжений в линейных вязкоупругих средах // Строительство. 1996. № 1.

35. Филиппов И.Г., Дмоховский А.В., Скропкин С.А., Кобахидзе Е.Г. Методика исследования свойств вязкоупругих оптически-чувствительных материалов при импульсном нагружении // Изучение упругих и вязкоупругих волн напряжений методами

фотоупругости и голографической интерферометрии. М., 1988. С. 48–67.

36. Двалишвили В.В., Смоилов М.И., Худодян А.В. Исследование динамического напряженного состояния подземных сооружений методом фотоупругости // Всесоюзная конф. по методу фотоупругости : сб. тр. № 8. Таллин, 1979. Т. 3.

37. Жаворонок И.В., Хе В.И., Леонтьева И.Г., Макаров Ю.А. Применение голографической интерферометрии при исследовании волн напряжений // Изучение упругих и вязкоупругих волн напряжений методом фотоупругости и голографической интерферометрии: сб. трудов МГСУ. М., 1988.

38. Двалишвили В.В., Костин И.Х., Немчинов В.В., Юренева Е.В. Волны напряжения в моделях основания и подземных сооружений // Изучение упругих и вязкоупругих волн напряжений методом фотоупругости и голографической интерферометрии : сб. тр. МГСУ. М., 1988.

39. Хесин Г.Л., Костин И.Х., Маршак Ю.И., Коротихин В.П., Худадян А.В. Применение магнитоимпульсной техники нагружения моделей при исследованиях методом фотоупругости плоских зарядов ВВ конечной длины и волн напряжений в цилиндрических оболочках // Развитие методики исследования напряжений и деформаций поляризационно-оптическим методом : сб. тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева № 137 / под ред. Г.Л. Хесина. М., 1976. С. 40–45.

40. Нетребко В.П. Фотоупругость анизотропных тел. М. : Наука, 1988.

41. Шарафутдинов Г.З. Об основах метода интегральной фотоупругости // Вестник МГУ. Серия 1. Математика. Механика. 1995. № 5. С. 70–79.

42. Шарафутдинов Г.З., Эльберт Ю.В. О применении метода «замораживания» в нелинейной фотоупругости // Развитие методов экспериментальной механики / под ред. Н.А. Махутова и др. М. : ИМАШ РАН, 2003. С. 140–150.

43. Шабанов А.П. Определение параметров двойного лучепреломления в полярископе с белым источником света. Развитие методов экспериментальной механики / под ред. Н.А. Махутова и др. М. : ИМАШ РАН, 2003. С. 140–150.

44. Краснов Л.А. Цветность изохром в фотоупругости. Экспериментальная механика и расчет сооружений. М. : МГСУ, 2004. С. 49–62.

45. Ахметзянов М.Х., Тихомиров В.М., Суровин П.Г. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещин // Изв. высш. уч. завед. Строительство. 2003. № 1 (529). С. 19–25.

46. Тихомиров В.М. Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом фотоупругости в трехмерных задачах механики разрушения. Развитие методов экспериментальной механики /

под ред. Н.А. Махутова и др. М. : ИМАШ РАН, 2003. С. 103–112.

47. Тихомиров В.М., Тырин В.П. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для пространственных трещин с использованием метода рассеянного света // Заводская лаборатория. 1989. Т. 55. № 11. С. 96–98.

48. Албаут Г.Н., Харина Н.В., Садовничий В.П., Семенова Ю.И., Федин С.А. Нелинейные задачи механики разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. С. 1344–1348.

49. Албаут Г.Н., Барышников В.Н. Исследование задач механики трещин в эластомерах при больших упругих деформациях // Развитие методов экспериментальной механики / под ред. Н.А. Махутова и др. М. : ИМАШ РАН, 2003. С. 157–168.

50. Албаут Г.Н., Табанюхова М.В., Харина Н.В. Определение первого коэффициента интенсивности напряжений в элементах с угловыми вырезами // Экспериментальная механика и расчет сооружений (Костинские чтения). М. : МГСУ, 2004. С. 166–175.

51. Нетребко В.П. Исследование методом фотоупругости коэффициентов интенсивности напряжений около наклонных трещин в ортотропных пластинах // Развитие методов экспериментальной механики / под ред. Н.А. Махутова и др. М. : ИМАШ РАН, 2003. С. 69–77.

52. Ушаков Б.Н. Анализ напряжений в композитных конструкциях с применением фотоупругости. Экспериментальная механика // Перспективы развития и применения (Хесинские чтения. 2001 г.) : сб. ст. М. : МГСУ, 2001. С. 85–91.

53. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Landik L.V. The stress state near a singular point of a flat composite design // Vestnik TGU Math. Mech. 2013. No. 4 (24). Pp. 80–87.

54. Матвеев В.П., Накарякова Т.О., Севодина Н.В., Шардаков И.Н. Сингулярность напряжений в вершине однородных и составных конусов при разных граничных условиях // ПММ. 2008. Т. 72. № 3. С. 487–494.

55. Варданян Г.С., Фриштер Л.Ю. Анализ НДС в окрестности нерегулярной точки на особой линии области с применением элементов теории размерности // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2007. Т. 3. № 2. С. 75–81.

56. Фриштер Л.Ю., Савостьянов В.Н. О возможностях анализа экспериментального решения упругой задачи в зоне концентрации напряжений // Вестник МГСУ. 2011. № 1. С. 50–55.

57. Экспериментальная механика. Перспективы развития и применения (Хесинские чтения. 2001 г.) : сб. статей. М. : МГСУ, 2001. 154 с.

58. Экспериментальные методы исследования напряжений и деформаций. Материалы коллоквиума. М. : МГСУ, 1999. 72 с.
59. Развитие методов экспериментальной механики / под ред. Н.А. Махутова, Б.Н. Ушакова, М.М. Гаденина. М. : ИМАШ РАН, 2003. 188 с.
60. Экспериментальная механика и расчет сооружений (Костинские чтения. 2004 г.) : сб. ст. М. : МГСУ, 2004. 274 с.
61. Кошеленко А.С., Позняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М. : Изд. дом «Граница», 2004. 296 с.
62. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела : учебное пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 240 с.
63. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Определение нагруженности и дефектности элементов конструкций на основе минимизации расхождения между экспериментальными и расчетными данными // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 1. С. 71–78.
64. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Последовательно углубляемый дисковый разрез – индикатор остаточных напряжений в пространственных телах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 93–102.
65. Chernyatin A.S., Razumovskii I.A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate, and residual stress level in elements of NPP equipment // Strength of Materials. 2013. Vol. 45. Issue 4. Pp. 506–511. DOI: 10.1007/s11223-013-9486-6
66. Кулиев В.Д., Разумовский И.А. К проблеме определения остаточных напряжений в биметаллах // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. С. 561–565.
67. Фомин А.В. Обратные задачи фотоупругости. Экспериментальная механика. Перспективы развития и применения. М. : МГСУ, 2001. С. 61–65.
68. Герасимова Т.Е., Степанова Л.В. Метод фотоупругости и его приложения для решения задач механики разрушения: построение высших приближений в полном решении М. Уильямса // Вестник Самарского государственного университета. 2017.
69. Frishter L.Yu. Photoelasticity-based study of stress-strain state in the area of the plain domain boundary cut-out area vertex // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. 2018. Pp. 837–844. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_89
70. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Morozov E.V., Goldstein R.V. Unification of computation and experimental methods of testing for crack resistance: development of the fracture mechanics and new goals // Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov. 2017. Vol. 83. Issue 10. Pp. 55–64. DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-10-55-64
71. Frushter L.U. Visualization of the photoelastic method data in the angular zone of a region // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1425. P. 012144. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012144
72. Frishter L. Stress-strain state generation within a stress concentration zone using the photoelasticity method // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Pp. 692–700. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_65
73. Кондратьев В.А. Краевые задачи для эллиптических уравнений в областях с коническими или угловыми точками // Тр. Московского математического общества. 1967. Т. 16. С. 209–292.
74. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Ижевск, 2018. 872 с.
75. Аксентян О.К. Особенности напряженно-деформированного состояния плиты в окрестности ребра // Прикладная математика и механика. 1967. Т. 31. № 1. С. 178–186.
76. Chobanjan K.S., Gevorkjan S.H. The behavior of the stress field near the angular point of the separation line in the problem of plane deformation of a composite elastic body // Bulletin of the Academy of Science of the Armenian SSR. 1971. Issue XXIV. No. 5. Pp. 16–24.
77. Денисюк И.Т. Одна задача сопряжения аналитических функций в аффинно-преобразованных областях с кусочно-гладкими границами // Изв. вузов. Математика. 2000. № 6. С. 70–74.
78. Кулиев В.Д. Сингулярные краевые задачи. М. : Наука, 2005. 719 с.
79. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения: Специальные задачи механики разрушения. М. : ЛЕНАНД, 2017. 192 с.
80. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М. : Машиностроение, 1973. 200 с.
81. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М. : Физматлит, 2006. 328 с.

Поступила в редакцию 31 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 1 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Вадим Николаевич Савостьянов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, член-корреспондент Академии водохозяйственных наук; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; FrishterLY@mgsu.ru;

Людмила Юрьевна Фриштер — доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой высшей математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 44031407, ORCID: 0000-0003-3962-899X, Scopus: 6505846674, ResearcherID: 13-4347-2016; FrishterLY@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Frokht M.M. *Photoelasticity: a polarization-optical method for studying stresses*. Moscow; Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1948-1950. (rus.).
2. *Photoelasticity method. In 3 volumes / under ed. of G.L. Khesin*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975; 1:326; 2:311; 3:311. (rus.).
3. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. *Polarized light method of deformable solid body mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1974; 576. (rus.).
4. *Polarized light method of stress research. Bibliographic index of domestic and foreign literature 1966-1970. Moscow, 1970 (AS USSR State Machine Science Research Institute), 1971-1978*. Moscow, 1979; 267. (rus.).
5. Coker E., Faylon L. Optical method of stress research. Moscow, ONTI, transl. from Eng., 1936.
6. Vardanjian G.S. Experimental determining method of thermal stress and their concentration. *Bull. AS Arm. SSR. Ser. phys.-mat. Sciences*. 1961; 5. (rus.).
7. Vardanjian G.S., Prigorovsky N.I. Modelling of thermoelastic stress in polarized light method. *Bull. AS USSR. Mechanics and machine-building*. 1962; 4. (rus.).
8. Prigorovsky N.I., Vardanjian G.S. Determining of thermal stress using "freezing" and "unfreezing". *Strength problem in machine-building. Issue 8*. Ed. AS USSR, 1962. (rus.).
9. *Study of thermal stress / under ed. by N.I. Prigorovsky*. Moscow, Nauka Publ., 1972; 228. (rus.).
10. Prigorovsky N.I. et al. *Stress and strain in machine parts and assemblies*. Moscow, Mashgiz, 1961; 564. (rus.).
11. Durelli A. *Raily, Introduction in Photomechanics : Transl. from Eng / under ed. by N.I. Prigorovsky*. Moscow, Mir, 1970. (rus.).
12. Khaimova-Mal'kova R.I. *Stress research methods: polarized light method*. Moscow, Nauka Publ., 1970. (rus.).
13. Polarized light method of stress research. *Collection of scientific papers of All-Union Conferences / ed. LSU, 1930, 1936, 1941, 1958, 1964*. Tallinn, 1971. (rus.).
14. Abena H.K. *Integral photoelasticity*. Tallinn, Valgus, 1975. (rus.).
15. Kasatkin B.S., Lobanov A.B., Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Polukhin P.I., Chichenov N.A. *Experimental research methods of strain and stress. Reference book*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981; 385. (rus.).
16. *Papers of VII All-Union Conference on polarized light method of stress research. In 4 volumes*. Tallinn, AS ESSR, 1971. (rus.).
17. *Materials of VIII All-Union Conference on photoelasticity. In 4 volumes*. Tallinn, AS ESSR, 1979. (rus.).
18. Khesin G.L., Dolgoplov V.V., Savostyanov V.N. Study of thermal stress state of concrete blocks of hydrotechnical facilities by photoelasticity method. *Hydrotechnical Construction*. 1968; 12:12-15. (rus.).
19. Rozanov N.S., Mikhaylova I.A. Study of thermal stress state of construction blocks. *Bull. of VNIIG*. 1976; 84:85-11. (rus.).
20. Ushakov B.N., Frolov I.P. *Stress in composite structures*. Moscow, Machine-building, 1979. (rus.).
21. Bugayenko S.E. Modelling of stress from specified non-combined deflections by polarized light method. *Bull. AS USSR. Solid body mechanics*. 1980; 4:8-11. (rus.).
22. Bugayenko S.E. Conditions on discontinuity boundaries of distortion tensor or its derivatives. *Bull. AS USSR. Solid body mechanics*. 1979; 1:94-99. (rus.).
23. Yevstratov B.N., Prigorovsky N.I., Razumovskii I.A. Studies of stress in spatial structures of energy equipment by mechanical modelling. *Stress Study in Structures*. 1980; 56-66. (rus.).
24. Vardanjian G.S., Frishter L.J. Modellierung thermoelastischer Spannungen in zusammengesetzten Konstruktionen. *Spannungsoptische Untersuchungen. Beiträge (3). Bauakademie. DDR*. Berlin, 1986.
25. Vardanjian G.S., Savostyanov V.N., Frishter L.Yu. The development photoelasticity method for solutions of piece-homogeneous elastic problems of solid mechanics. *Proceeding SPIE the international Society for Optical Engineering. Photomechanics '95*. Novosibirsk, 1995; 44. (rus.).
26. Savostyanov V.N., Agakhanov E.K. Equivalence of impact systems in static problem of deformable solid body mechanics. *Development of methods of erection, calculation and design of civil structures*. Moscow, 1989; 12-13. (rus.).
27. Bell J.F. *Experimental basics of deformable solid body mechanics*. Moscow, Nauka Publ., Part I. Small deformations, 600, Part 2. Finite deformations, 432. (rus.).
28. *Experimental mechanics : In 2 vol. / Trans. from Eng; Under editorship by A. Kobayashi*. Moscow, Mir Publ., 1990; 1:615. 2:551. (rus.).

29. Cert. of authorship USSR No. 1786370 A1 MPK G01, B9/021. *Pulse holographic fixture*. 07.01.93. Bull. No. 1.
30. Cert. of authorship USSR No. 1796893 A1 MPK G01, B9/04. *Pulse holographic fixture*. Bull. 23.02.93. No. 7.
31. Savostyanov V.N., Omelchenko D.I. Modelling of stress strain state of structures at different Poisson's ratios of the materials of the model and the object. *Transactions of IHE, Construction and architecture*. 1989; 4. (rus.).
32. Savostyanov V.N., Agakhanov E.K. Modeling of suspending and filtration forces in the photoelasticity method. *Hydrotechnical construction*. Moscow, Energoprogress Publ., 1996; 7:8-10. (rus.).
33. Savostyanov V.N., Frishter L.Yu. Modeling of piecewise-uniform problem of deformable solid body mechanics by photoelasticity method. *Bull. of AS Solid body mechanics*. Moscow, 1993; 6. (rus.).
34. Kostin I.Kh., Dmokhovskiy A.V., Dvalishvili V.V. Similarity criteria at modelling of strain wave propagation in linear viscoelastic media. *Construction*. 1996; 1. (rus.).
35. Filippov I.G., Dmokhovskiy A.V., Skropkin S.A., Kobakhidze Ye.G. Method of studies of properties of viscoelastic optically sensitive materials at pulse-type loading. *Studying of elastic and viscoelastic stress waves by photoelasticity and holographic interferometry methods*. Moscow, 1988; 48-67. (rus.).
36. Dvalishvili V.V., Smoylov M.I., Khudoyan A.V. Study of dynamic stress state of underground structures by photoelasticity method. *Coll. of papers No. 8 of All-Union Conference on the photoelasticity method*. Tallinn, 1979; 3. (rus.).
37. Zhavoronok I.V., Khe V.I., Leontyeva I.G., Makarov Yu.A. Use of holographic interferometry in studies of stress waves. *Stress waves by photoelasticity and holographic interferometry methods: coll. of papers of MSUCE*. Moscow, MICE, 1988. (rus.).
38. Dvalishvili V.V., Kostin I.Kh., Nemchinov V.V., Yureneva Ye.V. Stress waves in models of foundation and underground structures. *Studying of elastic and viscoelastic stress waves by photoelasticity and holographic interferometry methods: coll. of papers of MSUCE*. Moscow, MICE, 1988. (rus.).
39. Khesin G.L., Kostin I.Kh., Marshak Yu.I., Korotikhin V.P., Khudadyan A.V. Use of magnet pulse technique of model loading at studies of flat explosive charges of finite length and stress waves in cylindric shells by photoelasticity method. *Method development of stress and strain research by polarized light method* / under ed. by G.L. Khesin. Coll. of papers of MICE n.a. V.V. Kuybyshev, No. 137. Moscow, MICE, 1976; 40-45. (rus.).
40. Netrebko V.P. *Photoelasticity of anisotropic bodies*. Moscow, Nauka Publ., 1988. (rus.).
41. Sharafutdinov G.Z. Basics of integral photoelasticity method. *Moscow State University Bulletin. Series 1. Mathematics. Mechanics*. 1995; 5:70-79. (rus.).
42. Sharafutdinov G.Z., Elbert Yu.V. Use of "freezing" method in non-linear photoelasticity. *Development of methods of experimental mechanics* / under ed. by N.A. Makhutova et al. Moscow, IMASH RAN, 2003; 140-150. (rus.).
43. Shabanov A.P. Determining of parameters of double beam refraction in a polariscope with a white light source. *Development of methods of experimental mechanics* / under ed. by N.A. Makhutova et al. Moscow, IMASH RAN, 2003; 140-150. (rus.).
44. Krasnov L.A. *Isochromic chromaticity in photoelasticity. Experimental mechanics and calculation of buildings*. Moscow, MSUCE, 2004; 49-62. (rus.).
45. Akhmetzyanov M.Kh., Tikhomirov V.M., Surovin P.G. Determining of stress intensity factors at mixed type of cracks loading. *Trans. of inst. of higher ed. Construction*. Moscow, 2003; 1(529):19-25. (rus.).
46. Tikhomirov V.M. Determining of stress intensity factors by photoelasticity methods in 3D problems of destruction mechanics. *Development of methods of experimental mechanics* / under ed. by N.A. Makhutova et al. Moscow, IMASH RAN, 2003; 103-112. (rus.).
47. Tikhomirov V.M., Tyurin V.P. Determining of stress intensity factors for spatial cracks using scattered light method. *Workshop laboratory*. Moscow, 1989; 55(11):96-98. (rus.).
48. Albaut G.N., Kharinova N.V., Sadovnichiy V.P., Semyonova Yu.I., Fedin S.A. Non-linear problems of destruction mechanics. *Transactions of Nizhny Novgorod University n.a. N.I. Lobachevsky. MDTT, No. 4*. Moscow, 2011; 1344-1348. (rus.).
49. Albaut G.N., Baryshnikov V.N. Studies of problems of crack mechanics in elastomers at large elastic deformations. In coll. *Development of methods of experimental mechanics* / Under editorship by N.A. Makhutova et al. Moscow, IMASH RAN, 2003; 157-168. (rus.).
50. Albaut G.N., Tabanyukhova M.V., Kharinova N.V. Determining of the first stress intensity factor in elements with wedge-shaped notches. *Experimental mechanics and calculation of buildings (Kostin's readings)*. Moscow, MSUCE, 2004; 166-175. (rus.).
51. Netrebko V.P. Study of stress intensity factors in the vicinity of inclined cracks in orthotropic plates by photoelasticity method. *Development of methods of experimental mechanics* / under ed. by N.A. Makhutova et al. Moscow, IMASH RAN, 2003; 69-77. (rus.).
52. Ushakov B.N. Stress analysis in composite structures using photoelasticity. *Experimental mechanics. Prospects of development and application (Khesin's readings. 2001)*. Coll. of papers Moscow, MSUCE, 2001; 85-91. (rus.).
53. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Landik L.V. Stress state near a singular point of a flat composite de-

sign. *Transactions of TSU. Mathematics and Mechanics*. 2013; 4(24):80-87. (rus.).

54. Matveyenko V.P., Nakaryakova T.O., Sevodina N.V., Shardakov I.N. Stress singularity in the vertex of uniform and composite cones at different limit conditions. *PMM*. 2008; 72(3):487-494. (rus.).

55. Vardanyan G.S., Frishter L.U. The analysis of the strain-stress distribution in the vicinity of the irregular point on the special line of area with application of elements of the theory of dimension. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2007; 3(2):75-81. (rus.).

56. Frishter L.U., Savostjanov V.N. On possibilities for analysis experimental decision in tension concentration areas. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1:50-55. (rus.).

57. Experimental mechanics. *Prospects of development and application (Khesin's readings. 2001) : Coll. of papers*. Moscow, MSUCE, 2001; 154. (rus.).

58. *Experimental stress and strain research methods. Colloquium materials*. Moscow, MSUCE, 1999; 72. (rus.).

59. *Development of methods of experimental mechanics* / under ed. by N.A. Makhutova, B.N. Ushakova, M.M. Gadenina. Moscow, IMASH RAN, 2003; 188. (rus.).

60. *Experimental mechanics and calculation of buildings (Kostin's readings. 2004) : Coll. of papers*. Moscow, MSUCE, 2004; 274. (rus.).

61. Koshelenko A.S., Poznyak G.G. *Basic theory and praxis of photomechanics in machine-building*. Moscow, Granitsa Publ. house, 2004; 296. (rus.).

62. Razumovskii I.A. *Interference-optical methods of deformable solid body mechanics: tutorial*. Moscow, Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 2007; 240. (rus.).

63. Razumovskii I.A., Chernyatin A.S. Determining of loading degree and defectiveness of structural elements based on minimizing of the divergence between the experimental and numerical data. *Workshop laboratory. Diagnostics of materials*. 2012; 1:71-78. (rus.).

64. Chernyatin A.S., Razumovskii I.A. Sequentially deepened disc cut – residual stress indicator in spatial bodies. *Problems of machine-building and machine reliability*. 2015; 5:93-102. (rus.).

65. Chernyatin A.S., Razumovskii I.A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate, and residual stress level in elements of NPP equipment. *Strength of Materials*. 2013; 45(4):506-511. DOI: 10.1007/s11223-013-9486-6

66. Kuliyeu V.D., Razumovskii I.A. Determining problem of residual stress in bi-metallic materials. *Papers of AS USSR*. Moscow, 1990; 315:561-565. (rus.).

67. Fomin A.V. Inverse problems of photoelasticity. *Experimental mechanics. Prospects of development and application*. Moscow, MSUCE, 2001; 61-65. (rus.).

68. Gerasimova T.Ye., Stepanova L.V. The photoelasticity method and its applications for solving of problems of the destruction mechanics: plotting of the highest approximations in the full solution by M. Williams. *Proceedings of Samara State University*. Samara, 2017. (rus.).

69. Frishter L.Yu. Photoelasticity-based study of stress-strain state in the area of the plain domain boundary cut-out area vertex. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2018; 837-844. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_89

70. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Morozov E.V., Goldstein R.V. Unification of Computation and Experimental Methods of Testing for Crack Resistance: Development of the Fracture Mechanics and New Goals. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2017; 83(10):55-64. DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-10-55-64

71. Frishter L.U. Visualization of the photoelastic method data in the angular zone of a region. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425:012144. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012144

72. Frishter L. Stress-strain state generation within a stress concentration zone using the photoelasticity method. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 692-700. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_65

73. Kondratyev V.A. Boundary problems for elliptical equations in areas with conical or angular points. *Papers of Moscow mathematical society*. Moscow, MSU, 1967; 16:209-292. (rus.).

74. Cherepanov G.P. *Brittle destruction mechanics*. Izhevsk, 2018; 872. (rus.).

75. Aksentyan O.K. Specifics of stress strain behaviour of a plate in edge vicinity. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1967; 31(1):178-186. (rus.).

76. Parton V., Morozov E. *Brittle destruction mechanics: Special problems of destruction mechanics*. Moscow, LENAND, 2017; 192. (rus.).

77. Chobanjan K.S., Gevorkjan S.Kh. The behaviour of the stress field near the angular point of the separation line in the problem of plane deformation of a composite elastic body. *Bulletin of the Academy of Science of the Armenian SSR. Mechanics*. 1971; XXIV(5):16-24. (rus.).

78. Denisyuk I.T. Singular problem of conjunction of analytical functions in affinely transformed areas with piecewise-smooth borders. *Trans. of IHE, Mathematics*. 2000; 6:70-74. (rus.).

79. Kuliyeu V.D. *Singular boundary problems*. Moscow, Nauka, 2005; 719. (rus.).

80. Makhutov N.A. *Resistance of structural elements to brittle destruction*. Moscow, Machine-building, 1973; 200. (rus.).

81. Matviyenko Yu. *Fracture mechanics models and criteria*. Moscow, Fizmatlit, 2006; 328. (rus.).

Received May 31, 2021.

Adopted in revised form on October 1, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

BIONOTES: **Vadim N. Savostyanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organizations of Construction Production, Corresponding Member of the Academy of Water Management Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; FrishterLY@mgsu.ru;

Lyudmila Yu. Frishter — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 44031407, ORCID: 0000-0003-3962-899X, Scopus: 6505846674, ResearcherID: 13-4347-2016; FrishterLY@mgsu.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Прогрессирующее предельное состояние конструкций на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации

Леонид Юлианович Ступишин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается один из основных вопросов строительной механики — определение элементов, в которых первым наступит предельное состояние. На первый взгляд задача имеет бесконечное количество результатов, имея в виду бесконечное число вариантов нагружения системы. Задача становится решаемой, если исследовать конструкцию здания (сооружения) на возможные вариации перемещений (усилий) в узлах конструкции. Для такого подхода становится необходимым определение главных величин и соответствующих им векторов перемещений системы, которые приводят к максимальным (минимальным) значениям деформаций (усилий) в стержнях системы. Развивается новый подход теории сооружений, позволяющий выявить последовательность наступления предельного состояния в элементах конструкции здания (сооружения).

Материалы и методы. Для определения вариантов распределения экстремальных значений внутренних усилий (деформаций) в системе используется постановка задачи в виде проблемы собственных значений. Математическая модель задачи на собственные значения оказывается наиболее удобной, так как, кроме экстремальных значений (как в задаче оптимизации), дает возможность учитывать значения параметров задачи на верхней и нижней грани области ограничений. Теоретической основой постановки задачи является критерий критических уровней внутренней потенциальной энергии системы, позволяющий отыскивать состояния самонапряжения конструкции, соответствующие предельным состояниям элементов конструкции.

Результаты. Методика решения задачи иллюстрируется на примере статически неопределимой пятистержневой фермы. Приведена матричная формулировка задачи и подробный алгоритм ее решения. Показано, что величины внутренних усилий в стержнях, полученные с помощью традиционной методики, находятся в интервале между максимальными и минимальными главными значениями усилий для состояния самонапряжения системы. Даны решения на каждом из критических уровней энергии, соответствующие выключению элементов из работы на нагрузку вследствие наступления предельного состояния.

Выводы. Представлены примеры возможного использования методики в расчетной практике, варианты применения в практике проектирования, а также дальнейшего развития теории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стержневые системы, матричные методы, предельные состояния, потеря несущей способности, критические уровни энергии, слабое звено, метод сил, метод конечных элементов

Благодарности. Автор выражает благодарность: Б.В. Гусеву, анонимным рецензентам за моральную поддержку идей статьи; В.Л. Мандрю за обсуждение содержания и терминологии статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ступишин Л.Ю. Прогрессирующее предельное состояние конструкций на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1324–1336. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1324-1336

Автор, ответственный за переписку: Леонид Юлианович Ступишин, StupishinLyu@mgsu.ru.

Progressive limit state at critical levels of internal potential energy of deformation

Leonid Yu. Stupishin

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

ABSTRACT

Introduction. The work is devoted to one of the main issues of structural mechanics - the determination of the elements in which the limiting state occurs first. At first glance, the task has an infinite number of results, meaning an infinite number of options for loading the system. The problem becomes solvable if one examines the structure of a building (structure) for

possible variations in displacements (forces) in the nodes of the structure. For this approach, it becomes possible to determine the main values and vectors of displacement of the system, which correspond to the maximum (minimum) values of deformations (forces) in the rods of the system. As close approaches to the formulation of the problem, one should indicate the theory of the limiting equilibrium of structures under the assumption of the work of the material under flow conditions, where the equality of the work of external forces and internal forces is considered (kinematic method), or possible static stress states of the system for maximum limiting loads (static method). The theory of protecting buildings and structures from progressive collapse seeks to solve similar problems, focusing on options for design solutions that prevent destruction from non-design loads.

Materials and methods. To determine the options for the distribution of extreme values of internal forces (deformations) in the system, the problem is formulated in the form of an eigenvalue problem. The latter turns out to be the most convenient mathematical model of the problem, since, in addition to extreme values (as in the optimization problem), it allows one to take into account the values of the problem on the upper and lower bounds. The theoretical basis for the formulation of the problem is the criterion of the critical levels of the internal potential energy of the system, which makes it possible to find the self-stress states of the structure corresponding to the limiting states of the structural elements.

Results. The methodology for solving the problem is illustrated by the example of a statically indeterminate five-rod truss, which was also considered by other authors. The matrix formulation of the problem and a detailed algorithm for its solution are given. It is shown that the values of the internal forces in the rods, obtained using the traditional method, are in the interval between the maximum and minimum main values of the self-stress state of the system. Solutions are given at each of the critical energy levels corresponding to the disconnection of bonds from work.

Conclusions. The examples of the possible use of the technique in computational practice are given. Possible options for application in design practice, as well as further development of the theory are indicated.

KEYWORDS: core systems, matrix methods, limit states, loss of bearing capacity, critical energy levels, weak link, force method, finite element method

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to: B.V. Gusev, anonymous reviewers for the moral support of the ideas of the article; Mondrus V.L. for a discussion of the content and terminology of the article.

FOR CITATION: Stupishin L.Yu. Progressive limit state at critical levels of internal potential energy of deformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1324-1336. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1324-1336 (rus.).

Corresponding author: Leonid Yu. Stupishin, StupishinLyu@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных целей строительной механики состоит в определении поперечных сечений элементов конструкции, где в первую очередь наступит предельное состояние. В случае если конструкция статически неопределима, возможен вариант дальнейшего увеличения нагрузки на систему и наступление предельного состояния в сечении другого элемента системы. Пока система статически неопределима и геометрически неизменяема, процесс увеличения нагрузки может продолжаться без потери несущей способности зданием (сооружением). Проектировщик оценивает несущую способность здания на каждом этапе изменения расчетной схемы, а также величины приложенных нагрузок, чтобы дать заключение о возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации. Здесь и в дальнейшем мы намеренно не уточняем вид предельного состояния элемента (или связей) системы, полагая, в соответствии с требованиями нормативных документов, что весь элемент или отдельные связи системы выводятся из работы на нагрузку, вследствие наступления предельного состояния в них.

Некоторые аналогии в постановке задачи исследования можно проследить в теории предельного равновесия систем, работающих в пластической стадии деформирования. Там последовательное появление пластических деформаций в элементах конструкции приводит к снятию связей, в результате чего

система из статически неопределимой, превращается в механизм. Из всех возможных видов механизмов, которые могут быть получены для рассматриваемой расчетной схемы, на основе условия равенства работ внешних и внутренних сил на возможных перемещениях, отыскивается минимальная разрушающая нагрузка (кинематический принцип). Второй подход базируется на статическом принципе — принципе максимума интенсивностей внешних нагрузок, уравновешенных внутренними усилиями в элементах конструкции, не превышающими своих предельных значений [1, 2]. Существуют алгоритмы линейного программирования, а также реализующие их программные средства, позволяющие находить величины предельных разрушающих нагрузок и виды механизмов, получающихся из неизменяемой системы [3–10].

С другой стороны, постановка задачи переключается с широко применяемой теорией прогрессирующего обрушения конструкций, которая становится одной из важнейших в проектировании безопасных и устойчивых к аварийным состояниям конструктивных схем зданий и сооружений [11–13]. Цель теории прогрессирующего обрушения конструкций — формулирование основных положений и общих требований «по проектированию защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения при аварийной расчетной ситуации вследствие предполагаемого начального локального разрушения, приводящего к изменению конструктивной системы».

Современный свод правил СП 385.1325800.2018, подготовленный ведущими специалистами в этой области, предписывает «для зданий и сооружений в качестве локального разрушения... рассматривать разрушение (удаление) нижеперечисленных несущих конструкций одного (любого) этажа на участке, ограниченном кругом площадью не менее 40 м² для зданий и сооружений высотой до 100 м, не менее 80 м² для зданий и сооружений высотой от 100 м до 200 м и не менее 100 м² для зданий и сооружений высотой более 200...».

Очевидно, что эти требования основываются на опыте проектирования зданий и обследования аварий зданий и сооружений. В практике проектирования зданий и сооружений сложилась методика использования типовых расчетных схем и модульных размеров конструкций. Поэтому наиболее логично выделить в сложном здании группы элементов, обладающие повышенной сопротивляемостью аварийным воздействиям. Для сокращения объема расчетов предлагается анализ исходной конструктивной схемы здания и вторичной, представляющей собой набор наиболее устойчивых к аварийным воздействиям схем, как это представлено в СП 385.1325800.2018. Вторичная схема определяется сводом правил как наиболее вероятная, которая может остаться после обрушения части здания. Методика расчета на живучесть строится исходя из существующей практики расчета и проектирования зданий и сооружений, как последовательность расчета первичной схемы здания на аварийные воздействия, а затем вторичной схемы здания, предлагаемой нормами.

Англоязычные нормы, и в частности Еврокод EN1990 «Основы проектирования сооружений», устанавливают требование живучести как дополнительное по отношению к требованиям по предельным состояниям: эксплуатационной пригодности и абсолютному предельному состоянию конструкции. Это требование ограниченности повреждений конструкции в результате взрыва, удара или субъективной ошибки. Предлагается ряд рекомендаций для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут повлиять на выбор конструктивных особенностей расчетной схемы здания. В Еврокоде EN1991-1-7 «Аварийные воздействия» приводятся различные варианты стратегий для обеспечения безопасности в случае аварий и даются рекомендации по расчету.

В общем случае методика расчета на прогрессирующее обрушение строится исходя из предположения, что в каком-то месте выключается из работы элемент или группа несущих конструкций, после чего традиционными методами определяется напряженно-деформированное состояние несущей системы здания и выдается прогноз о безопасности здания (сооружения) [11–27].

На основные вопросы теории, с какого несущего элемента начнется разрушение и какой элемент или группа несущих элементов потеряют несущую способность в следующую очередь, ответа нет.

Введем понятие о теории прогрессирующего предельного состояния конструкций как методике определения внутренних усилий в элементах деформируемой системы при варьировании главного вектора обобщенных перемещений (сил), приложенных в ее узлах. Целью выявления вариаций усилий служит получение информации о распределении внутренних усилий в элементах системы, которые будут изменяться подобным образом до момента перехода через критический уровень потенциальной энергии деформации системы. При переходе через критический уровень произойдет снятие связей в наиболее нагруженном элементе, что повлечет за собой изменение расчетной схемы или формы деформирования. Процесс снятия связей будет длиться до момента превращения системы в геометрически изменяемую конструкцию. Реализация методики позволяет проектировщику предсказать возможные конструктивные схемы и формы деформирования системы при последовательном наступлении предельного состояния в ее элементах.

Основное отличие предлагаемого подхода заключается в общности рассмотрения задачи с позиций нахождения «слабого звена» системы, в котором наступит предельное состояние в первую очередь [28]. Под «слабым звеном» системы будем понимать элемент или связь конструкции, в которых появятся экстремальные величины внутренних усилий, вызывающие предельное состояние в элементе с последующим выключением его из работы на внешние нагрузки. Поскольку наступление предельного состояния обусловлено достижением внутренней потенциальной энергии конструкции экстремального значения (включая верхнюю или нижнюю грань), критерий критических уровней энергии позволяет сформулировать математическую модель задачи в виде задачи на собственные значения. Благодаря такой широкой постановке задачи появляется возможность использования известных видов предельных состояний как первой, так и второй группы.

Методика нахождения «слабого звена» и снятие связей на каждом из последующих уровней критической энергии системы дает возможность исследовать свойства системы вплоть до превращения ее в механизм. У проектировщика появляется возможность «предусмотреть» различные сценарии разрушения конструкции здания (сооружения), а вследствие этого управлять процессом перераспределения усилий из-за удаления связей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При создании проекта конструкции проектировщик выбирает материал, форму поперечного сечения, длину элементов, вид закрепления в узлах и условия опирания конструкции в зависимости от целей использования здания с учетом сложившейся практики проектирования. Очевидно, что при таком подходе здание не универсально в отношении восприятия

возможных действующих нагрузок и будет иметь «слабые звенья», в которых, прежде всего, появится перенапряжение.

Здесь следует отметить два аспекта направлений исследования:

- определение несущих элементов, в которых произойдет отказ в первую очередь, а затем последовательности, в которой пойдут отказы остальных элементов в случае самого невыгодного нагружения системы;

- последовательность отказа элементов системы после снятия связей вследствие запроектного воздействия (аварийные воздействия при эксплуатации, террористические акты, природные катаклизмы).

В любом из этих случаев мы приходим к задаче о последовательном снятии связей ввиду достижения «слабым элементом» системы предельного состояния.

Выпишем задачу об определении перемещений конструкции в форме метода перемещений:

$$[K]\{\xi\} = \{\Phi_{ex}\}, \quad (1)$$

где $[K]$ — матрица внешней жесткости конструкции; $\{\xi\}$ — вектор обобщенных перемещений системы; $\{\Phi_{ex}\}$ — вектор обобщенных реакций в узлах системы от внешних воздействий.

Выражение, записанное в виде (1), можно трактовать как равенство реакций в фиктивных связях, вызванных внутренними усилиями и внешними нагрузками. Поскольку величина внешней нагрузки нами не оговаривается заранее при выводе уравнений метода перемещений, то условие (1) выполняется для любых нагрузок, в том числе единичных и нулевых [29]. В последнем случае, кроме нулевого вектора узловых перемещений, могут иметь место и ненулевые перемещения для случая самонапряжения системы. Другими словами, на всех уровнях нагружения конструкции перераспределение перемещений узлов происходит в соответствии с обобщенными жесткостями конструкции в направлении возможных перемещений, как и в случае самонапряжения.

Это условие можно записать как вариации возможных перемещений в узлах системы [30]

$$[K]\{\delta\xi\} = [\lambda]\{\delta\xi\}, \quad (2)$$

где матрица $[\lambda]$ содержит значения главных (экстремальных) жесткостей системы, если воздействия на систему осуществлялись в направлении степеней свободы, в соответствии с векторной матрицей $\{\delta\xi\}$.

Физический смысл выражения (2) с учетом правой части (1) — существование главных видов самоуравновешенного напряженного состояния системы (самонапряжений), при которых внутренняя потенциальная энергия системы достигает критических значений, а отдельные элементы конструкции находятся в предельном состоянии. При этом внутренние усилия системы уравнивают внешнюю нагрузку на критических уровнях нагружения. На каждом критическом уровне энергии, начиная с первого, и далее, когда будут удалены связи, на-

ходившиеся в предельном состоянии, изменится и состояние самонапряжения конструкции. Но на каждом критическом уровне энергии состояние самонапряжения будет отвечать условию (2).

Приведем некоторые известные из строительной механики соотношения, представленные в матричном виде, и сформулируем алгоритм нахождения наиболее нагруженной связи, в которой наступит предельное состояние в первую очередь. Повторение решения задачи после выключения связи из работы на нагрузку будет моделировать прогрессирующий процесс наступления предельного состояния в других элементах системы. Алгоритм распространения последовательного разрушения элементов системы будет выглядеть следующим образом.

1. Строим матрицу внутренней жесткости системы $[C]$ и, используя уравнения равновесия узлов системы, строим статическую матрицу конструкции $[A]$.

2. С помощью полученных матриц строим матрицу внешней жесткости системы. Матрица внешней жесткости конструкции может быть определена через матрицу внутренней жесткости системы и статическую матрицу как

$$[K] = [A][C][A]^T. \quad (3)$$

Если вести решение в форме метода сил, следует вычислить матрицу податливости системы как $[L] = [K]^{-1}$.

3. Решаем задачу на собственные значения для матрицы податливости, полученной по матрице жесткости. Решение задачи на собственные значения (2) для выражения (3) позволит выявить состояние системы с минимальной жесткостью и соответствующий ей собственный вектор обобщенных перемещений $\{\delta\xi\}$. Мы получаем обобщенные реактивные усилия в узлах системы, перемножая минимальное собственное значение на соответствующий собственный вектор

$$\{\delta\Phi_{min}\} = [L_{min}]\{\delta\xi_{min}\}. \quad (4)$$

Аналогичным образом можно найти вектор узловых перемещений при решении задачи в форме метода перемещений. Для матрицы податливости системы вычисляем главные направления векторов узловых перемещений как собственные значения, умноженные на собственные векторы

$$\{\delta\xi_{max}\} = [\lambda_{max}]\{\delta\Phi_{max}\}. \quad (5)$$

Нормированные по максимальному значению векторы воздействий в узлах системы совпадают с точностью до знака

$$\{\delta\Phi_{min}^e\} = -\{\delta\xi_{max}^e\}. \quad (6)$$

Узловые векторы внешних воздействий показывают такие направления воздействий, от которых внутренние усилия в стержнях системы и деформации стержней будут иметь максимальные значения.

4. Вычисление деформаций и внутренних усилий в системе в форме метода перемещений имеет вид

$$\{\epsilon_{\min}\} = -[A]^T \{\delta \xi_{\min}\}, \{N_{\min}\} = [C] \{\epsilon_{\min}\}. \quad (7)$$

В случае выполнения решения в форме метода сил вычисляем матрицу — проектор главных направлений внешних сил на оси стержней.

$$[S] = -[C][A]^T[L]. \quad (8)$$

Затем можно вычислить внутренние усилия в стержнях системы по полученным значениям главных податливостей каждого из стержней

$$\{N_{\max}\} = [S] \{\delta \Phi_{\max}\}. \quad (9)$$

Деформации по внутренним усилиям находим по выражению

$$\{\epsilon_{\max}\} = [C]^{-1} \{N_{\max}\}. \quad (10)$$

Нормированные значения векторов продольных усилий и деформаций, определенные по методу сил и методу перемещений, равны

$$\{\epsilon_{\min}^e\} = \{\epsilon_{\max}^e\}, \{N_{\min}^e\} = \{N_{\max}^e\}. \quad (11)$$

Ненормированные величины усилий и деформаций отличаются на постоянные множители.

5. Решение задачи на собственные значения дает возможность определить связь, в которой возникнут максимальные значения внутренних усилий и деформаций в стержнях системы. Если условие предельного состояния представлено в усилиях, удаляем стержень с максимальными усилиями и переходим к пункту 6.

Если предельное состояние задано через деформации, удаляем стержень с превышением предельных величин деформаций, найденных по выражению (7) или (10). Определяем стержни системы, которые будут соответствовать максимальным значениям деформаций в стержнях системы. Если предельное состояние задано через ограничение деформаций, удаляем стержень, в котором нарушено условие предельного состояния, и переходим к п. 6.

В случае задания нескольких видов ограничений выбираем стержень с экстремальными значениями усилий и деформаций в соответствии с условиями поставленной задачи.

6. Для новой системы без связи, исключенной в предыдущем пункте, повторяем процедуру, начиная с п. 1. Проверяем геометрическую неизменяемость системы на каждом этапе по условию

$$\det[A] \neq 0. \quad (12)$$

Продолжаем решение по алгоритму до получения статически определимой системы. Условием потери несущей способности считаем превращение системы в геометрически изменяемую конструкцию согласно (12).

7. По полученным нормированным значениям предельных нагрузок, просуммированным по всем

этапам, находим значения предельных нагрузок на систему.

Анализ значений предельных нагрузок в узлах системы позволяет построить карту допускаемых нагрузок в узлах конструкции, на которой будут показаны величины проекций предельных нагрузок на горизонтальные и вертикальные направления (или другие, удобные для проектировщика).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачу на прогрессирующее предельное состояние на первом этапе будем рассматривать как задачу поиска «слабого звена» конструкции. Другими словами, считаем, что в процессе эксплуатации стержни системы утратили часть несущей способности равномерно по всем элементам. Наша задача — найти стержень, с которого может начаться разрушение системы даже вследствие проектных воздействий.

Определение главных значений вариаций узловых сил и перемещений в системе

Рассмотрим один раз статически неопределимую пятистержневую ферму, которая рассматривалась в работах [31–33] и приведена на рис. 1.

На рис. 1, *a* показаны первоначальные произвольно выбранные степени свободы системы для решения задачи в форме метода сил, где вариации обобщенных усилий $[\delta \Phi_i]$, $i = \overline{1,4}$. На рис. 1, *b* приведены степени свободы системы в тех же направлениях, принимаемые для расчета системы в форме метода перемещений, где вариации обобщенных перемещений $[\delta \Phi_i]$, $i = \overline{1,4}$.

Для простоты будем считать, что жесткости стержней одинаковы, а степени свободы системы, в направлении которых ведем варьирование перемещений, привязаны к узлам системы. На рис. 1, *a* показаны жесткости и номера стержней, а также геометрические размеры стержней фермы. На рис. 1, *c*, *d* — схемы вырезанных из системы узлов, необходимые для составления уравнений равновесия в направлении выбранных степеней свободы.

Матрица внутренней жесткости системы имеет вид

$$[C] = EA/l \begin{vmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \text{нули} \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ \text{нули} & & & & 0,7071 \\ & & & & & 0,7071 \end{vmatrix}, \quad (13)$$

где длины наклонных стержней равны по $l\sqrt{2}$ каждый.

Чтобы построить статическую матрицу, записываем уравнения равновесия в направлении произвольно выбранных первоначальных степеней свободы для вырезанных узлов. Для первого узла

$$\begin{aligned} \sum \delta \Phi_1 &= 0, N_1 + N_4 \cos 45 + \delta \Phi_1 = 0, \\ \sum \delta \Phi_2 &= 0, N_3 + N_4 \sin 45 + \delta \Phi_2 = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

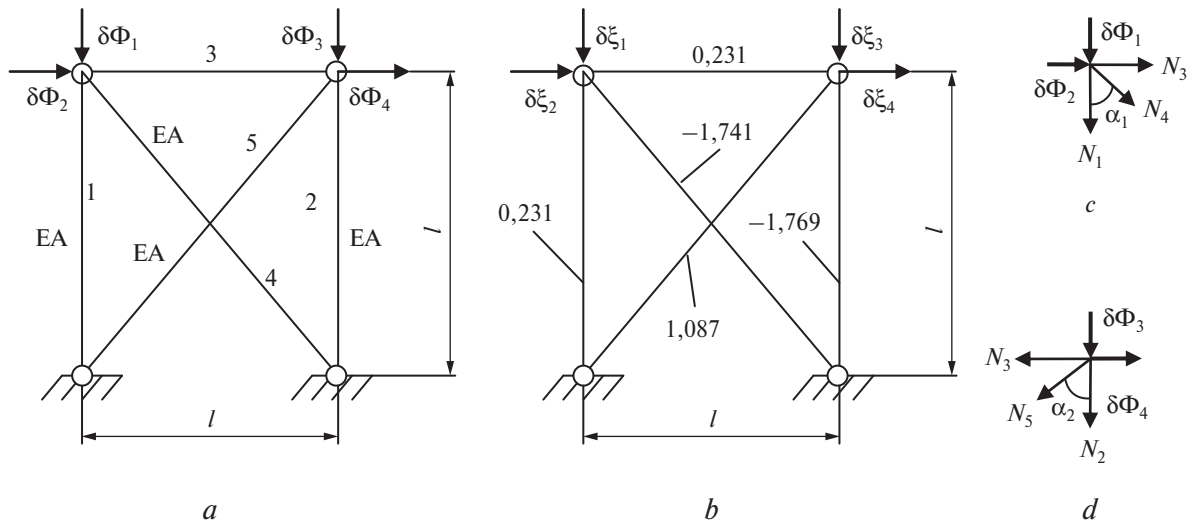


Рис. 1. Ферма: *a* — расчетная схема с начальными произвольно выбранными направлениями степеней свободы в узлах в виде вариации внешних сил; *b* — усилия в стержнях фермы от единичных сил, приложенных в направлении степеней свободы, поделенные на EA/l ; *c* — левый вырезанный узел с возможными степенями свободы и возникающими усилиями; *d* — правый узел с возможными степенями свободы и возникающими усилиями

Fig. 1. Truss: *a* — design scheme with the initial arbitrarily chosen directions of the degrees of freedom at the nodes in the form of variations in external forces; *b* — efforts in the truss rods from unit forces applied in the direction of the degrees of freedom, divided by EA/l ; *c* — left cut out node with possible degrees of freedom and emerging forces; *d* — right node with possible degrees of freedom and emerging forces

для второго узла

$$\begin{aligned} \sum \delta \Phi_3 = 0, N_2 + N_5 \cos 45 + \delta \Phi_3 = 0, \\ \sum \delta \Phi_4 = 0, -N_3 - N_5 \sin 45 + \delta \Phi_4 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Статическая матрица, построенная на основе уравнений равновесия узлов, к которым привязаны степени свободы узлов, запишется как

$$[A] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -0,7071 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -0,7071 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -0,7071 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0,7071 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица внешней жесткости, вычисляемая по формуле (3), имеет вид

$$[K] = EA/l \begin{bmatrix} 1,3535 & 0,35354 & 0 & 0 \\ 0,35354 & 1,3535 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,3535 & -0,35354 \\ 0 & 0 & -0,35354 & 1,3535 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Вычисляем собственные значения матрицы податливости $[L] = [K]^{-1}$. Матрица собственных значений

$$[\lambda] = l/EA \begin{bmatrix} 4,1463 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4055 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6822 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8057 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Матрица, составленная из собственных векторов системы, может быть представлена как

$$[\delta f] = \begin{bmatrix} 0,2142 & -0,2142 & 0,6739 & -0,6739 \\ -0,6739 & -0,6739 & 0,2142 & 0,2142 \\ -0,2142 & -0,2142 & -0,6739 & -0,6739 \\ -0,6739 & 0,6739 & 0,2142 & -0,2142 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Каков физический смысл полученных результатов? Если мы выберем первоначальные направления возможных внешних усилий в узлах системы (обычно — это горизонтальные и вертикальные направления вдоль декартовой правосторонней системы координат), а затем вычислим усилия в стержнях от этих сил, то получим один из вариантов распределения усилий в заданной системе, совпадающий с результатами, полученными в работе [32]. Этот вариант распределения усилий представлен на рис. 1, *b*. Вместо эпюр продольных усилий рядом со стержнями проставлены числовые значения усилий.

Очевидно, что могут существовать направления приложения вариаций внешних сил (перемещений), которые соответствуют максимальным величинам податливости фермы и минимальной податливости. Решив задачу на собственные значения для первоначальной матрицы податливости (11), мы нашли максимальные и минимальные собственные значения (12) и соответствующие им собственные векторы (13), которые указывают направления виртуальных внешних воздействий для этих состояний. Будем на-

зывать эти направления и соответствующие собственные значения вариаций усилий и перемещений главными вследствие того, что, кроме экстремальных значений, определяются значения, соответствующие верхней и нижней грани экстремальной задачи.

Поскольку система имеет четыре степени свободы, получаем еще два собственных значения, имеющих промежуточные значения по отношению к экстремальным величинам. На рис. 2 показаны усилия в стержнях фермы, вычисленные для максимального (рис. 2, *a*) и минимального (рис. 2, *b*) собственных значений, а также направления вариаций внешних воздействий, соответствующих собственным векторам задачи.

Первое собственное значение соответствует максимальной податливости системы на первом уровне критической энергии системы. Если нагружение системы вести таким образом, что результирующие внешней нагрузки будут направлены как первый собственный вектор, то усилия и деформации в системе будут изменяться подобным образом с коэффициентом, равным первому собственному значению. Первому собственному значению (уровню энергии системы) соответствует первый вид самонапряжения (см. рис. 2, *a*), где усилия возникают в симметрично расположенных стержнях, а в третьем стержне — нулевое.

Второй собственный вектор (см. рис. 2, *b*) дает состояние самонапряжения с минимальными усилиями. Вычисления показывают наличие усилий во всех стержнях системы, в симметрично расположенных стержнях усилия, как и в первом случае, одинаковы с точностью до знака.

Результаты расчета для произвольно выбранных осей, приведенные на рис. 1, *b*, показывают, что усилия для единичных воздействий находятся в проме-

жутке между максимально возможными усилиями самонапряжения и минимально возможными усилиями самонапряжения (см. рис. 2, *b*).

Усилия самонапряжения для третьего и четвертого собственного значения представлены на рис. 3.

Обратим внимание, что второе и третье состояния самонапряжения приводят к такому распределению усилий, что во всех стержнях системы усилия ненулевые. Величины усилий, как и для первоначально принятого направления, находятся в интервале между усилиями от максимального собственного значения и усилиями от минимального собственного значения.

Для пояснения полученных результатов проведем аналогию с исследованием напряженного состояния в точке тела. В общем случае от заданных нагрузок мы получаем компоненты тензора напряжений в точке, аналогично решению, полученному нами на рис. 1, *b*. На втором этапе находятся площадки, где напряжения имеют экстремальные значения, чтобы иметь возможность записать условия прочности в точке тела. Для рассматриваемого нами примера — это результаты решения задачи на собственные значения (18), (19), показанные на рис. 2, *a, b*. То есть подбор поперечных сечений стержней или проверка их прочности по результатам, приведенным на рис. 1, *b*, не дает наилучший возможный проект фермы.

Решение задачи прогрессирующего предельного состояния для системы с удаленной связью

Возвращаясь к решению поставленной задачи, делаем заключение, что четвертый и пятый стержни могут потерять несущую способность от одинакового усилия, но разных знаков. Будем считать, что прочность стержней на растяжение и сжатие одинакова,

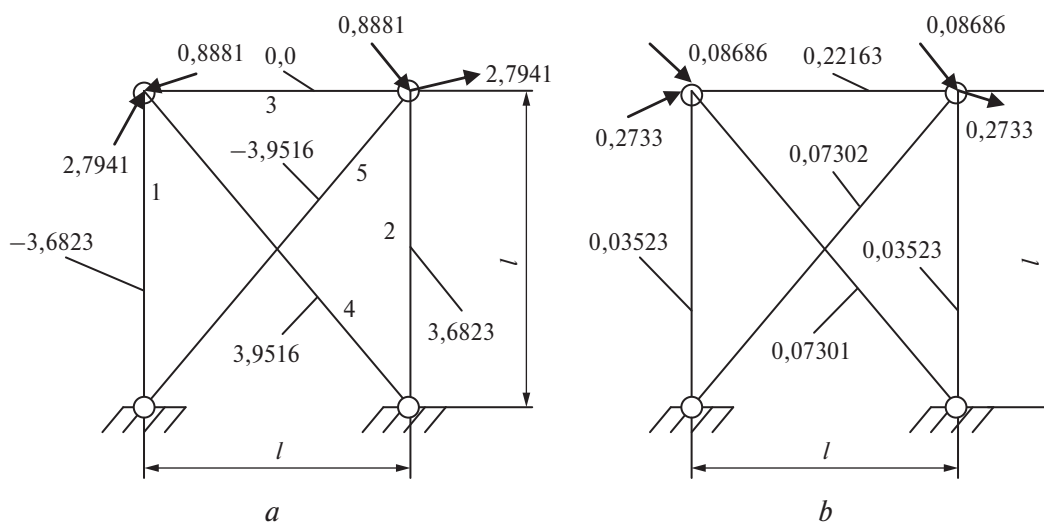


Рис. 2. Ферма: *a* — первый собственный вектор и соответствующие ему усилия (максимальные); *b* — второй собственный вектор и соответствующие ему усилия (минимальные)

Fig. 2. Farm: *a* — the first eigenvector and the corresponding efforts (maximum); *b* — the second eigenvector and the corresponding efforts (minimum)

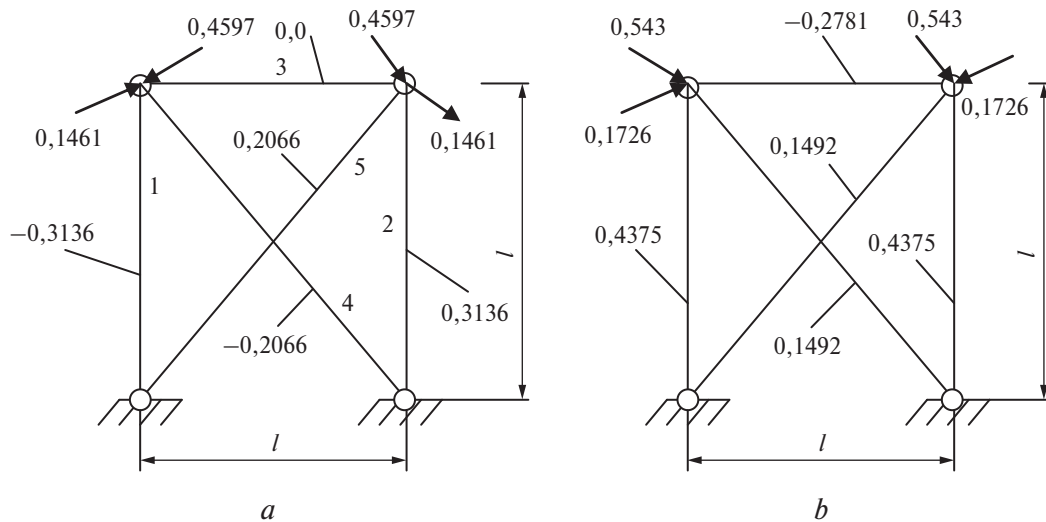


Рис. 3. Ферма: *a* — третий собственный вектор и соответствующие ему усилия; *b* — четвертый собственный вектор и соответствующие ему усилия

Fig. 3. Farm: *a* — third eigenvector and corresponding efforts; *b* — the fourth eigenvector and the corresponding efforts

тогда предельное состояние может быть достигнуто в любом из этих стержней. Пусть предельное состояние наступает от потери устойчивости. Тогда первым удаляется пятый стержень при нормированном значении предельной силы $P_{cr} = 1,08\Phi$.

На втором этапе рассматривается система с удаленным пятым стержнем, показанная на рис. 4.

Матрица внутренней жесткости системы имеет вид

$$[C] = EA/l \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7071 \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Статическая матрица запишется как

$$[A]_2 = EA/l \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & -0,7071 \\ 0 & 0 & -1 & -0,7071 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Матрица жесткости вычисляется по формуле (3).

$$[K] = EA/l \begin{vmatrix} 1,3535 & 0,35354 & 0 & 0 \\ 0,35354 & 1,3535 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (22)$$

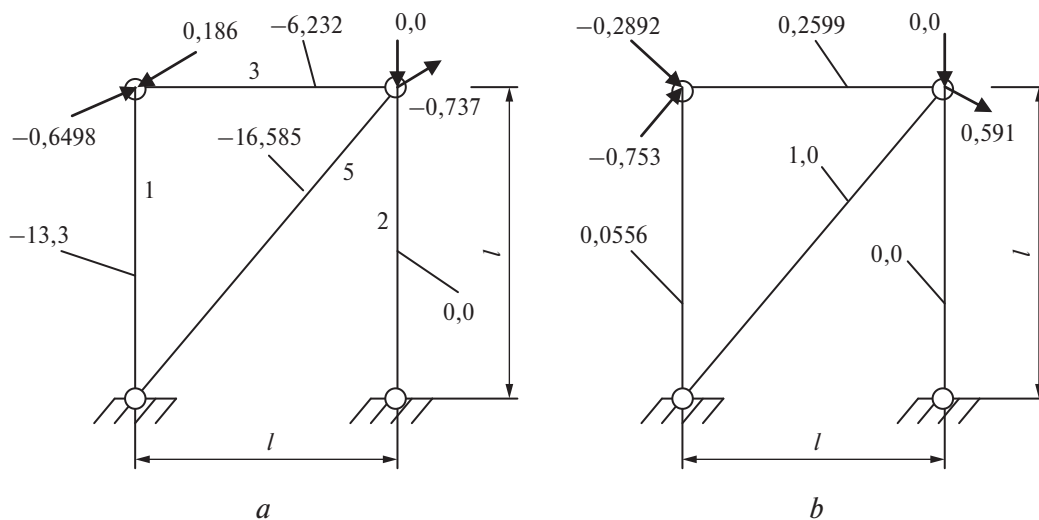


Рис. 4. Ферма: *a* — первый собственный вектор и соответствующие ему усилия; *b* — третий собственный вектор и соответствующие ему усилия

Fig. 4. Farm: *a* — the first eigenvector and the corresponding efforts; *b* — the third eigenvector and the corresponding efforts

Собственные значения матрицы податливости имеют вид

$$[\lambda] = \begin{vmatrix} 8,4567 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7606 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4397 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Собственные векторы матрицы податливости запишутся как

$$[\delta\Phi] = \begin{vmatrix} 0,186 & -0,939 & -0,2892 & 0 \\ 0,6498 & 0,1032 & -0,7530 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,737 & -0,328 & 0,591 & 1 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Как можно видеть из рис. 4, распределения усилий для максимального собственного значения и минимального собственного значения подобны. Отличаются на нормировочный множитель соответственно собственным значением векторов. Нормированные собственные усилия

$$\{\delta N_{\min}^e\} = \begin{vmatrix} -0,802 \\ 0 \\ -0,3758 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (25)$$

Усилия, вычисленные в стержнях, показывают, что наиболее нагруженный стержень — пятый наклонный с усилием $P_{cr} = 1,0\delta\Phi$. Предельная нагрузка на систему за два этапа составила $P_{cr} = 2,0\delta\Phi$.

Таким образом, «слабым звеном» фермы, представленной на рис. 1, является четвертый наклонный стержень. Предельным состоянием, которое приводит к потере несущей способности, может быть либо потеря прочности от сжатия стержня, либо потеря устойчивости при нормированной величине внутреннего усилия $P_{cr} = 1,0\delta\Phi$. Несложно видеть, что система со снятой связью (в виде четвертого стержня) не становится геометрически изменяемой, а является статически определимой. Возможно дальнейшее нагружение системы, при этом состояние самонапряжения фермы отличается от предыдущего. Наиболее нагруженным стержнем становится пятый наклонный стержень. Максимальное усилие в нем достигает значения $P_{cr} = 1,0\delta\Phi$.

То есть снятие пятой связи может привести к геометрически изменяемой системе, и второй критический уровень внутренней энергии системы будет определять предельное состояние системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из проведенных исследований следуют некоторые выводы, позволяющие расширить понимание вопросов, связанных с переходом сложных систем в предельное состояние и особенностями работы на предельные нагрузки.

1. Принцип Лагранжа, на котором основаны существующие подходы к расчету конструкций, определяет условия, обеспечивающие равенство реакции системы и действующих на систему внешних воздействий при выполнении условий совместности деформаций. При этом вопрос о полном исчерпании системой несущей способности остается открытым, поскольку нагрузке сопоставляется только часть внутренней энергии тела, необходимая для ее уравнивания. Поэтому существуют и развиваются теории оптимального проектирования конструкций, теория чувствительности конструкций, и другие, ставящие целью найти проект, фактически, не имеющий запаса прочности.

- Критерий критических уровней энергии изначально исследует экстремальные состояния внутренней энергии деформации твердого тела, которым впоследствии сопоставляется допустимая нагрузка на систему. Поэтому исчерпание несущей способности системы на определенном критическом уровне связывается с потерей связей и изменением расчетной схемы конструкции.

2. Согласно матричному методу перемещений строительной механики любые возможные сочетания внешних нагрузок приложены в узлах системы. Реакция деформируемой системы на возможные возмущения также приводится к узлам системы. При этом если внешние нагрузки по каким-то направлениям степеней свободы системы отсутствуют, можно не рассматривать и реакции системы по указанным направлениям. Уменьшение размерности матрицы не меняет распределение внутренних усилий. Это следует из теории матриц, где доказывается, что изменение размерности матрицы не изменяет ее собственных значений.

3. Как было показано выше, оптимальное распределение усилий в системе определяется состояниями самонапряжения системы, полученными из решения задачи на собственные значения (2).

4. Из выражений (6) и (11) следует, что коэффициент, определяемый соотношением собственных значений, полученных решением задачи в усилиях и перемещениях, имеет смысл упругой характеристики конструкции в целом на рассматриваемом критическом уровне деформаций.

5. Общеизвестный факт, что кривая равновесных состояний для образца материала и конструкции в эксперименте различны, получает теоретическое обоснование. Для любых систем от одного критического уровня к другому меняются характеристики жесткости системы вследствие потери части связей, что приводит к нелинейной кривой состояний равновесия системы, при справедливости закона Гука для каждого уровня энергии, до момента потери связи

$$\{\Phi\} = [E]\{\xi\}, \quad (26)$$

где $[E]$ — матрица упругих характеристик системы.

6. Предложенная методика позволяет:

- проектировать стержневые системы с оптимальным распределением усилий (деформаций) в стержнях системы;

- подбирать оптимальное распределение геометрических характеристик стержней при условии восприятия максимально возможной нагрузки на систему;
- решать задачи регулирования усилий в системе при действии различных видов нагрузок и воздействий;

- ставить и решать задачи прогрессирующего предельного состояния стержневых систем при проектных и непроектных воздействиях.

Развитие метода даст возможность исследовать как изгибаемые стержневые системы, так и сплошные деформируемые среды типа грунтовых оснований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М. : Госстройиздат, 1954. 288 с.
2. Чирас А.А. Методы линейного программирования при расчете упруго-пластических систем. Л. : Стройиздат, 1969. 198 с.
3. Toi Y., Kawai T. Discrete limit analysis of plate and shell structures // Computers & Structures. 1984. Vol. 19. Issue 1–2. Pp. 251–261. DOI: 10.1016/0045-7949(84)90225-6
4. Yang W.H. Large deformation of structures by sequential limit analysis // International Journal of Solids and Structures. 1993. Vol. 30. Issue 7. Pp. 1001–1013. DOI: 10.1016/0020-7683(93)90023-z
5. Cocchetti G., Maier G. Elastic–plastic and limit-state analyses of frames with softening plastic-hinge models by mathematical programming // International Journal of Solids and Structures. 2003. Vol. 40. Issue 25. Pp. 7219–7244. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00363-9
6. Seshadri R., Fernando C.P.D. Limit loads of mechanical components and structures using the gloss r-node method // Journal of Pressure Vessel Technology. 1992. Vol. 114. Issue 2. Pp. 201–208. DOI: 10.1115/1.2929030
7. Alwis W.A.M. Limit analysis using systematically generated mechanisms // Computers & Structures. 1988. Vol. 28. Issue 3. Pp. 353–359. DOI: 10.1016/0045-7949(88)90075-2
8. Kim J.-S., Kim J.-Y. Simplified elastic-plastic analysis procedure for strain-based fatigue assessment of nuclear safety class 1 components under severe seismic loads // Nuclear Engineering and Technology. 2020. Vol. 52. Issue 12. Pp. 2918–2927. DOI: 10.1016/j.net.2020.05.008
9. Ngoc Trinh Trần, Manfred Staat. Direct plastic structural design under random strength and random load by chance constrained programming // European Journal of Mechanics — A/Solids. 2021. Vol. 85. P. 104106. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104106
10. Boustani C.E., Bleyer J., Arquier M., Ferradi M.-K., Sab K. Elastoplastic and limit analysis of 3D steel assemblies using second-order cone programming and dual finite-elements // Engineering Structures. 2020. Vol. 221. P. 111041. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111041
11. Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н. и др. О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитно-оболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2018. Т. 14. № 2. С. 30–47. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47
12. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М. : Издательство АСВ, 2014. 208 с.
13. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 103–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113
14. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 102 (2). P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
15. Обозов В.И., Беляев А.Ф. Анализ методов расчета на сопротивляемость прогрессирующему обрушению конструкций сооружений по нормам различных стран // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 2 (289). С. 53–60. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.2.53.60
16. Zhang Z., Chen Z. Constraint embankment construction to prevent the collapse of underground caves // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–18. DOI: 10.1155/2019/3607574
17. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2019/2354931
18. Wang W. Strain rate effect on the progressive collapse analysis of rc frame structure under earthquake // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/5808701
19. Shakib H., Zakersalehi M., Jahangiri V., Zamanian R. Evaluation of Plasco Building fire-induced

progressive collapse // Structures. 2020. Vol. 28. Pp. 205–224. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.058

20. Garg S., Agrawal V., Nagar R. Progressive collapse behaviour of reinforced concrete flat slab buildings subject to column failures in different storeys // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 43. Pp. 1031–1037. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.692

21. Zhi B., Wei P., Wang X., Li Z., Ren Y., Zhang H. et al. Research on the collapse coefficient of collapsible loess under unloading // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. Pp 1–12. DOI: 10.1155/2021/6672301

22. Jing W., Xing S., Song Y. Collapse-pounding dynamic responses of adjacent frame structures under earthquake action // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8851307

23. Xie F., Liu W., Gu B., Qian H. Study on the component-based model of an all-welded beam-column connection for progressive collapse analysis // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp 1–11. DOI: 10.1155/2020/8847866

24. Alanani M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method // Case Studies in Construction Materials. 2020. Vol. 13. P. e00457. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00457

25. El-desoqi M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast reinforced concrete beams using applied element method // Case Studies in Construction Materials. 2020. Vol. 13. P. e00456. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00456

Поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2021 г.

О Б АВТОРЕ: Леонид Юлианович Ступишин — кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры строительной и теоретической механики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3392-3788, Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Rzhansitsin A.R. *Calculation of structures taking into account the plastic properties of materials*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1954; 283. (rus.).

2. Chiras A.A. *Linear programming methods for calculating elastic-plastic systems*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1969; 198. (rus.).

3. Toi Y., Kawai T. Discrete limit analysis of plate and shell structures. *Computers & Structures*. 1984; 19(1-2):251-261. DOI: 10.1016/0045-7949(84)90225-6

4. Yang W.H. Large deformation of structures by sequential limit analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 1993; 30(7):1001-1013. DOI: 10.1016/0020-7683(93)90023-z

26. Panahi S., Zahrai S.M. Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse // Structures. 2021. Vol. 31. Pp. 1163–1172. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.02.045

27. Yang T., Liu Z., Lian J. Progressive collapse of RC flat slab substructures with unbonded posttensioning strands after the loss of an exterior column // Engineering Structures. 2021. Vol. 234. P. 111989. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111989

28. Ступишин Л.Ю., Мошкеевич М.Л. Задача об определении «слабого звена» в конструкции на основе критерия критических уровней энергии // Известия вузов. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 11–23. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-11-23

29. Ступишин Л.Ю. Оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений: ресурс несущей способности конструкций с дефектами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 39–44.

30. Ступишин Л.Ю. Предельное состояние строительных конструкций и критические уровни энергии // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 102–106.

31. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.

32. Ржаницын А.Р. Строительная механика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.

33. Bhatt P. Problems in structural analysis by Matrix Methods. NY: Construction Press, 1981. 465 p.

5. Cocchetti G., Maier G. Elastic-plastic and limit-state analyses of frames with softening plastic-hinge models by mathematical programming. *International Journal of Solids and Structures*. 2003; 40(25):7219-7244. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00363-9

6. Seshadri R., Fernando C.P.D. Limit loads of mechanical components and structures using the GLOSS R-Node method. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 1992; 114(2):201-208. DOI: 10.1115/1.2929030

7. Alwis W.A.M. Limit analysis using systematically generated mechanisms. *Computers & Structures*. 1988; 28(3):353-359. DOI: 10.1016/0045-7949(88)90075-2

8. Kim J.-S., Kim J.-Y. Simplified elastic-plastic analysis procedure for strain-based fatigue assessment

of nuclear safety class 1 components under severe seismic loads. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020; 52(12):2918-2927. DOI: 10.1016/j.net.2020.05.008

9. Ngoc Trinh Tran, Manfred Staat. Direct plastic structural design under random strength and random load by chance constrained programming. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2021; 85:104106. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104106

10. Boustani C.E., Bleyer J., Arquier M., Ferradi M.-K., Sab K. Elastoplastic and limit analysis of 3D steel assemblies using second-order cone programming and dual finite-elements. *Engineering Structures*. 2020; 221:111041. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111041

11. Belostotsky A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N. et al. About development of methods of analysis and assessment of vulnerability of spatial plate-shell reinforced concrete structures with allowance for physical non-linearities, crack formation and induced anisotropy. *International Journal for the Calculation of Civil and Building Structures*. 2018; 14(2):30-47. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47 (rus.).

12. 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.).

13. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(3):103-113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113

14. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 102(2):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14

15. Obozov V.I., Belyaev A.F. The analysis of calculation methods for resistance to the progressive collapse of the structures of buildings and structures in accordance with the norms of different countries. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020; 2(289):53-60. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.2.53.60 (rus.).

16. Zhang Z., Chen Z. Constraint embankment construction to prevent the collapse of underground caves. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-18. DOI: 10.1155/2019/3607574

17. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario. *Shock and Vibration*. 2019; 2019:1-12. DOI: 10.1155/2019/2354931

18. Wang W. Strain rate effect on the progressive collapse analysis of RC frame structure under earthquake. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-12. DOI: 10.1155/2020/5808701

19. Shakib H., Zakersalehi M., Jahangiri V., Zamanian R. Evaluation of Plasco Building fire-induced

progressive collapse. *Structures*. 2020; 28:205-224. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.058

20. Garg S., Agrawal V., Nagar R. Progressive collapse behaviour of reinforced concrete flat slab buildings subject to column failures in different storeys. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 43:1031-1037. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.692

21. Zhi B., Wei P., Wang X., Li Z., Ren Y., Zhang H. et al. Research on the Collapse Coefficient of Collapsible Loess under Unloading. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021:1-12. DOI: 10.1155/2021/6672301

22. Jing W., Xing S., Song Y. Collapse-pounding dynamic responses of adjacent frame structures under earthquake action. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-12. DOI: 10.1155/2020/8851307

23. Xie F., Liu W., Gu B., Qian H. Study on the component-based model of an all-welded beam-column connection for progressive collapse analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-11. DOI: 10.1155/2020/8847866

24. Alanani M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00457. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00457

25. El-desoqi M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast reinforced concrete beams using applied element method. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00456. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00456

26. Panahi S., Zahrai S.M. Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. *Structures*. 2021; 31:1163-1172. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.02.045

27. Yang T., Liu Z., Lian J. Progressive collapse of RC flat slab substructures with unbonded posttensioning strands after the loss of an exterior column. *Engineering Structures*. 2021; 234:111989. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111989

28. Stupishin L.Y., Moshkevich M.L. The problem of determining the “Weak Link” based on the internal energy critical levels of the construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 2(746):11-23. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-11-23 (rus.).

29. Stupishin L.U. Evaluation of state of load-bearing constructions of buildings and structures. Resource of bearing capacity of structures with defects. *Industrial and Civil Construction*. 2017; 10:39-44. (rus.).

30. Stupishin L.U. Limit state of building structures and critical energy levels. *Industrial and Civil Construction*. 2018; 10:102-106. (rus.).

31. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of structures and the possibility of their analysis*. Moscow, DMK Press, 2007; 600. (rus.).

32. Rzhantsin A.R. *Structural mechanics*. Moscow, Higher school, 1982; 400. (rus.).

33. Bhatt P. *Problems in structural analysis by Matrix Methods*. NY, Construction Press, 1981; 465.

Received July 19, 2021.

Adopted in revised form on October 28, 2021.

Approved for publication on October 28, 2021.

B I O N O T E S : **Leonid Yu. Stupishin** — PhD, Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3392-3788, Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 624.042.12

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1337-1345

Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии

Виталий Иванович Колчунов^{1,2}, Ву Нгок Туен³, Дмитрий Игоревич Нижегородов⁴

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

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

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

⁴ Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного
строительного университета (НИУ МГСУ); г. Мытищи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В нормативных документах ряда стран по нормированию защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения для расчетного анализа при особом воздействии используется такое понятие, как «зона возможного локального разрушения» конструктивной системы, очерчиваемая некоторым фрагментом каркаса здания в местах гипотетически удаляемых конструктивных элементов. Цель выделения таких наиболее напряженных зон в виде подконструкций — инженерная обозримость последствий аварийного воздействия с оценкой напряженно-деформированного состояния элементов, попадающих в эту зону. Предложен вариант моделирования динамических догрузок железобетонного каркаса многоэтажного здания, вызванных его структурной перестройкой, позволяющих определять параметры динамического отклика подконструкции в виде двухпролетной неразрезной балки с конечным числом степеней свободы, и более детально моделировать зону возможного локального разрушения элементов каркаса здания при внезапном удалении одной из несущих конструкций в этой зоне.

Материалы и методы. Зона возможного локального разрушения каркаса здания моделируется фрагментом конструктивной системы, прилегающим к данной зоне. Процесс удаления колонны моделируется приложением в противоположном направлении нагрузки $P(t)$, равной усилию в удаляемой колонне, вычисленному при расчете всего каркаса здания. Для решения системы уравнения движения подконструкции используется известный в динамике сооружений метод разложения по собственным формам колебаний.

Результаты. Приведены результаты теоретических исследований динамического эффекта железобетонной конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при ее внезапной структурной перестройке, вызванной особым аварийным воздействием в виде гипотетического удаления одной из несущих конструкций.

Выводы. Построенные на основе теории динамики сооружений уравнения движения подконструкции в виде двухпролетной неразрезной балки с конечным числом степеней свободы могут быть использованы для анализа особого предельного состояния железобетонных элементов конструктивных систем каркасов зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, живучесть, внезапное удаление колонны, прогрессирующее обрушение, динамика сооружений, конечное число степеней свободы, время отказа колонны, рэлеевское демпфирование, динамический отклик, подконструкция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колчунов В.И., Ву Нгок Туен, Нижегородов Д.И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1337–1345. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1337-1345

Автор, ответственный за переписку: Ву Нгок Туен, ngoctuyennd91@gmail.com.

Dynamic response of the building construction system with a finite degree of freedom under a special action

Vitaliy I. Kolchunov^{1,2}, Vu Ngoc Tuyen³, Dmitriy I. Nizhegorodov⁴

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

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
(NIISF RAACS); Moscow, Russian Federation;

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

⁴ Mytishchi branch of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
(MGSU); Mytishchi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the normative documents of a number of countries on the standardization of the protection of buildings and structures from progressive collapse, for the calculation analysis under special impact, such a concept as a “zone of possible local destruction” of a structural system is used, outlined by a fragment of the building frame in places of hypothetically removed structural elements. The purpose of identifying such most stressed zones in the form of substructures is engineering visibility of the consequences of an emergency impact with an assessment of the stress-strain state of elements falling into such a zone. In this regard, in the work under consideration, a variant of modeling the dynamic additional loading of the reinforced concrete frame of a multi-storey building caused by its structural restructuring is proposed, which makes it possible to determine the parameters of the dynamic response of the substructure in the form of a two-span continuous beam with a finite number of degrees of freedom and to model in more detail the zone of possible local destruction of the elements of the building frame at the sudden removal of one of the structural structures in this area.

Materials and methods. The zone of possible local destruction of the building frame is modeled by a fragment of the structural system adjacent to this zone. The process of removing a column was simulated by applying a load $P(t)$ in the opposite direction, equal to the force in the removed column, calculated when calculating the entire frame of the building. To solve the system of equations of motion of the substructure, we use the method of expansion in terms of natural vibration modes, which is well known in the dynamics of structures.

Results. The results of theoretical studies of the dynamic effect of a reinforced concrete structural system of a building with a finite number of degrees of freedom during its sudden restructuring caused by a special emergency impact in the form of a hypothetical removal of one of the load-bearing structures are presented.

Conclusions. The equations of motion of a substructure in the form of a two-span continuous beam with a finite number of degrees of freedom constructed on the basis of the theory of the dynamics of structures can be used to analyze the special limiting state of reinforced concrete elements of structural systems of frames of buildings and structures.

KEYWORDS: reinforced concrete, survivability, sudden removal of a column, progressive collapse, dynamics of structures, multiple-degrees-of-freedom (MDOF), column failure time, rayleigh damping, dynamic response, substructure

FOR CITATION: Kolchunov V.I., Vu Ngoc Tuyen, Nizhegorodov D.I. Dynamic response of the building construction system with a finite degree of freedom under a special action. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1337-1345. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1337-1345 (rus.).

Corresponding author: Vu Ngoc Tuyen, ngoctuyennd91@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в России и многих других странах мира уделяется все больше внимания. Важной составляющей при решении этой задачи является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в элементах конструктивной системы после особого воздействия в виде внезапного удаления из нее одной из несущих конструкций. В нормативных документах ряда стран^{1,2}, в том числе и в России³, для расчетного анализа при особом воздействии используется такое понятие, как «зона возможного локального разрушения» конструктивной системы, очерчиваемая некоторым фрагментом каркаса здания в местах гипотетически удаляемых конструктивных элементов. Цель выделения таких наиболее напряженных зон в виде подконструкций — инженерная обозримость последствий аварийного воздействия

с оценкой НДС элементов, попадающих в такую зону, с позиций критериев особого предельного состояния, и сокращение объема расчетного анализа нелинейного деформирования в динамической постановке [1–3]. Имеющийся опыт данного анализа для обычных, не уникальных зданий или сооружений [4–6] показывает, что такой расчетный анализ даже с применением компьютерных технологий и эффективных комплексов требует больших затрат времени вычислений и инженеров высокой квалификации особенно при проектировании железобетонных конструкций. В этой связи в работе предложена методология применения уровневых расчетных схем и аналитическое решение задачи моделирования динамических догрузений железобетонной подконструкции в виде двухпролетной неразрезной балки с конечным числом степеней свободы, вызванных ее структурной перестройкой от удаления одного из несущих элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В опубликованных в настоящее время исследованиях [7–9] для моделирования зоны локального разрушения каркасов зданий и сооружений используют уровневые расчетные схемы и методы декомпозиции. Первый уровень расчетной схемы (рис. 1, а) моделирует конструктивную систему всего здания, и с ее помощью определяется НДС всей конструктивной системы, как правило, с использованием численных методов и программных комплексов.

¹ UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defence USA, 2009. 188 p.

² Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Expansion Projects, prepared by Applied Research Associates for GSA, Washington, D.C., 2016. 203 p.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 33 с.

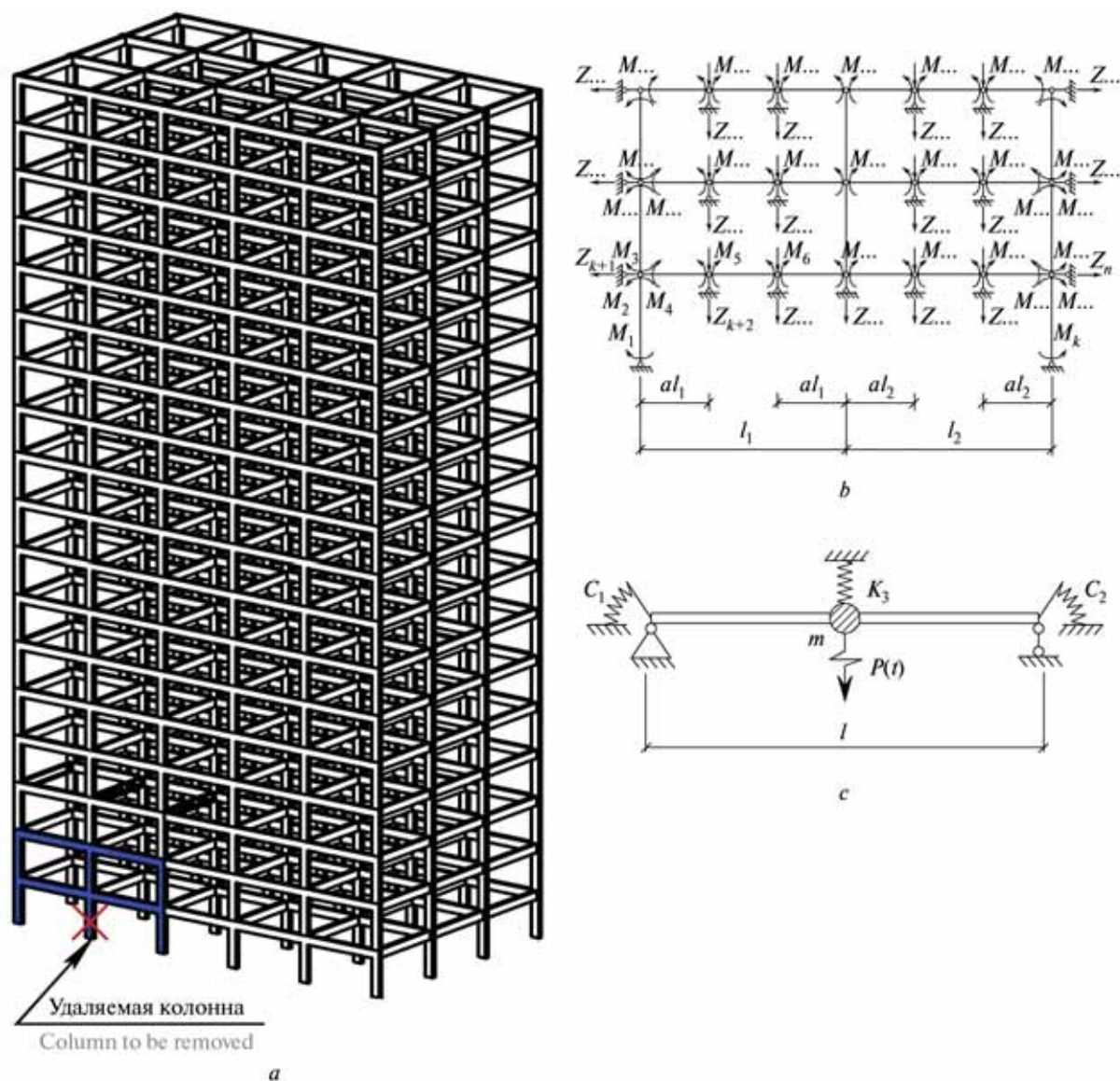


Рис. 1. Расчетная схема железобетонного каркаса здания первого (а), второго (b) и третьего (c) уровней
Fig. 1. Calculated scheme of the reinforced concrete frame of the building of the first (a), second (b) and third (c) levels

Второй уровень расчетной схемы (рис. 1, b) моделирует фрагмент здания в зоне возможного локального разрушения конструктивной системы при удалении из нее одной из конструкций (в рассматриваемом случае колонны). В зонах сопряжения выделяемого фрагмента с остальной частью каркаса здания накладываются граничные условия (податливые связи, перемещения и др.), моделирующие взаимное влияние оставшейся конструкции на изучаемый фрагмент. С применением расчетной схемы этого уровня в работах [10–12] для выявления последовательности образования пластических шарниров предложена специальным образом построенная система канонических уравнений неординарного варианта смешанного метода, позволяющая вычислять параметрическую нагрузку, при которой в сечениях элементов конструктивной системы достигают-

ся предельные усилия, и соответственно изменяется степень статической неопределимости конструктивной системы. При этом установлено, что степень статической неопределимости конструкции существенно влияет на нее при особом воздействии. На основе расчетной схемы второго уровня на энергетической основе были построены аналитические зависимости для определения приращений моментов и кривизны в стержневых конструкциях при динамических эффектах, возникающих от мгновенного удаления несущего элемента.

Третий уровень расчетных схем (рис. 1, c и рис. 2) моделирует конструктивный элемент или несколько элементов в подконструкции второго уровня, примыкающих к удаляемой колонне. В рассматриваемой конструктивной схеме подконструкция представлена в виде двухпролетной железобетонной балки с одной

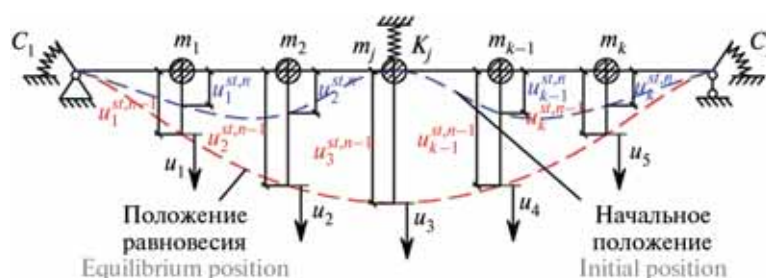


Рис. 2. Схемы динамического нагружения подконструкции при внезапном удалении центральной опоры по методике, изложенной в работах [13–15]

Fig. 2. Schemes of dynamic loading of a substructure with a sudden removal of the central support according to the method of [13–15]

или конечным числом степеней свободы. При такой расчетной схеме удобно вводить аналитическое описание движения нагруженной проектной нагрузкой подконструкции при ее структурной перестройке с использованием аппарата динамики сооружений и более детально моделировать зоны возможного локального разрушения здания при особом воздействии. В научных публикациях существуют два основных подхода построения уравнения движения подконструкции. Первый подход для расчета таких систем предлагался в работах Ю.В. Бондарева, А.Н. Потапова, Ю.Т. Чернова [13–15] (см. рис. 2). Допустим, что в этой подконструкции по какой-либо причине внезапно выключается опора j .

В начальный момент непосредственно после удаления опоры j система находится в начальном положении (синяя пунктирная линия), т.е. система выведена из положения статического равновесия. В этом случае за счет своих упругих свойств она стремится вернуться в положение равновесия (красная пунктирная линия) и совершает при этом свободные колебания. Таким образом, при внезапном удалении отдельных элементов или связей мы имеем задачу о свободных колебаниях системы с заданными начальными условиями (формула (2)). Выбирая для каждой массы начальную координату в положении статического равновесия системы, после разрушения опоры j уравнение колебания системы выглядит так:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = 0. \quad (1)$$

Начальные условия могут быть записаны в виде:

$$u(t=0) = \begin{cases} u_1(t=0) = u_1^{st,n} - u_1^{st,n-1} \\ u_2(t=0) = u_2^{st,n} - u_2^{st,n-1} \\ \dots \\ u_5(t=0) = u_5^{st,n} - u_5^{st,n-1} \end{cases}, \quad \dot{u}(t=0) = \{0\}, \quad (2)$$

где $u_i^{st,n}$, $u_i^{st,n-1}$ — соответственно статический прогиб системы в точке приложения массы m_i в n и $n-1$ раз статически неопределимой стержневой системе.

Уместно также отметить, что описанный подход рассматривает процесс мгновенного идеального раз-

рушения элемента, т.е. быстрое удаление элемента из конструкции. Хотя данный подход позволяет оценить худшие последствия, которые могут возникнуть в этих случаях с учетом динамического эффекта, он не идентичен реальному процессу разрушения несущего элемента зданий и сооружений, при котором разрушение имеет небольшую длительность.

Для устранения этого ограничения в работах [16–18] предложен вариант более общего подхода для определения динамического нагружения каркаса многоэтажного здания после выключения одного из несущих элементов, с учетом времени отказа конструкции (t_r) и особенности диссипации энергии в железобетоне. Процесс удаления колонны моделировался приложением в противоположном направлении нагрузки $P(t)$, равно усилию в удаляемой колонне, вычисленному при расчете всего каркаса здания. Была рассмотрена расчетная схема подконструкции в виде железобетонной балки, имеющей сосредоточенную массу m , и получено решение уравнения движения с одной степенью свободы. Важно, что при $t_r = 0$ результаты расчета полностью совпадают с результатами, полученными по методике Ю.В. Бондарева, А.Н. Потапова, Ю.Т. Чернова. В противном случае при $t_r > 0$ динамический отклик подконструкции заметно уменьшается.

В развитии этих работ целью следующего раздела явилась разработка методики расчета динамического отклика конструктивной системы каркаса здания с конечным числом степеней свободы при выключении несущего элемента из работы на том или ином этапе ее деформирования. С помощью предложенного подхода и разработанного алгоритма выполнено исследование железобетонного каркаса здания с разными сценариями особого воздействия, решение которых позволило выявить некоторые существенные особенности его статико-динамического деформирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя расчетную схему третьего уровня, зона возможного локального разрушения представ-

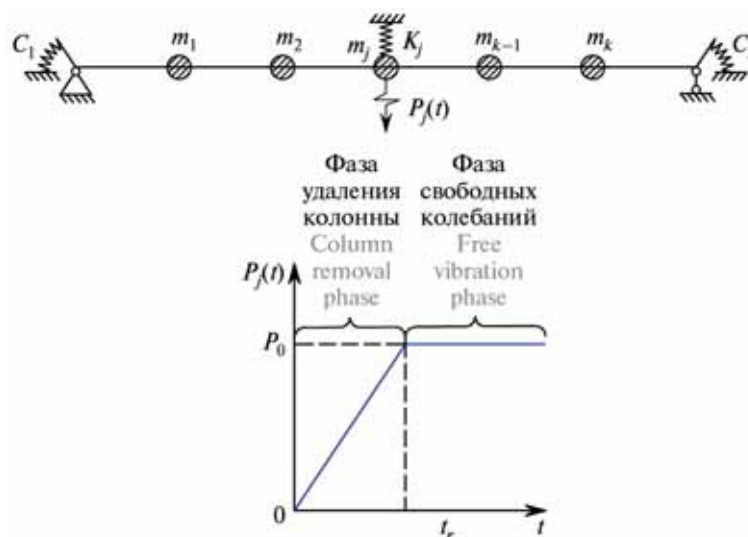


Рис. 3. Расчетная схема третьего уровня для моделирования динамического догружения подконструкции при внезапном удалении центральной опоры

Fig. 3. The calculated scheme of the third level for determining the dynamic loading of the substructure when the central support is suddenly removed

лена подконструкцией в виде двухпролетной железобетонной неразрезной балки, имеющей k -ное число сосредоточенных масс m_j (рис. 3).

В этой расчетной схеме введены следующие обозначения: K_j — линейная жесткость пружины, моделирующая влияние вышележащих этажей каркаса здания; C_1 и C_2 — угловые жесткости податливых узлов [19]. Внезапное удаление средней несущей колонны рассматриваемой подконструкции моделируется приложением в узле j запроектного воздействия $P_j(t)$, нарастающего по линейному закону до значения P_0 и остающегося затем постоянным. При этом P_0 — усилие в удаляемой колонне, вычисленное при расчете всего каркаса по первичной расчетной схеме первого уровня, моделирующей весь каркас здания:

$$P_j(t) = \begin{cases} P_0 \frac{t}{t_r} & \text{при } 0 < t \leq t_r, \\ P_0 & \text{при } t > t_r. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим записанное в матричном виде уравнение движения системы с k -ным числом степеней свободы:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = P(t), \quad (4)$$

где M , C , K — квадратичные матрицы масс, демпфирования и жесткостей соответственно; $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ — вектор узловых ускорений, скоростей и перемещений соответственно.

Вектор запроектного воздействия как функцию от времени $P(t)$ можно представить в виде:

$$P(t) = \{0 \ 0 \ \dots \ P_j(t) \ \dots \ 0 \ 0\}^T. \quad (5)$$

Для решения системы уравнения (4) используем известный в динамике сооружений метод разложения

по собственным формам колебаний. Представим искомый вектор узловых перемещений в виде:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \varphi_i q_i(t) = \Phi q(t), \quad (6)$$

где $\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1k} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \dots & \varphi_{nk} \end{bmatrix}$ — матрица, составлен-

ная из собственных векторов системы уравнений движения. При этом величины φ_{ij} представляют собой амплитудные значения перемещений j -ной собственной (главной) формы и называются амплитудными коэффициентами формы; $q(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \dots \ q_k(t)]^T$ — вектор обобщенных (главных) координат; $q_i(t)$ — функция времени, определяющая закон изменения во времени амплитудных коэффициентов формы.

Поставив выражение (6) в (4), получим:

$$M\Phi\ddot{q}(t) + C\Phi\dot{q}(t) + K\Phi q(t) = P(t). \quad (7)$$

Для системы с конечными степенями свободы демпфирование учитывается в определенной мере приближенно. Часто для того, чтобы матрица демпфирования приводилась к диагональному виду, используют предложение Рэлея о том, что затухание колебаний должно быть пропорционально массе и жесткости [20]. Тогда матрицу демпфирования C задают в виде суммы:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (8)$$

где α , β — константы Рэлея, которые необходимо определить по двум данным значениям коэффициентов демпфирования, относящимся к двум различным

частотам колебаний. Тогда уравнение (7) принимает вид:

$$M\Phi\ddot{q}(t) + (\alpha M\Phi + \beta K\Phi)\dot{q}(t) + K\Phi q(t) = P(t). \quad (9)$$

Умножив обе части зависимости (8) на транспонированную матрицу собственных векторов Φ^T , получим:

$$\Phi^T M \Phi \ddot{q}(t) + (\alpha \Phi^T M \Phi + \beta \Phi^T K \Phi) \dot{q}(t) + \Phi^T K \Phi q(t) = \Phi^T P(t). \quad (10)$$

С учетом ортогональности собственных векторов уравнение (10) сводится к виду:

$$\varphi_i^T M \varphi_i \ddot{q}_i(t) + (\alpha \varphi_i^T M \varphi_i + \beta \varphi_i^T K \varphi_i) \dot{q}_i(t) + \varphi_i^T K \varphi_i q_i(t) = \varphi_i^T P(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

или

$$\tilde{m}_i \ddot{q}_i(t) + \tilde{c}_i \dot{q}_i(t) + \tilde{k}_i q_i(t) = \tilde{P}_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где $\tilde{m}_i = \varphi_i^T M \varphi_i$; $\tilde{k}_i = \varphi_i^T K \varphi_i$; $\tilde{P}_i(t) = \varphi_i^T P(t)$ — соответственно являются диагональной матрицей обобщенных масс, жесткости и запроектного воздействия для i -ной формы колебания системы; $\tilde{c}_i = \alpha \tilde{m}_i + \beta \tilde{k}_i = (\alpha + \beta \omega_i^2) \tilde{m}_i$ — обобщенная диагональная матрица демпфирования.

Разделив обе части уравнения (12) на $\tilde{m}_i$, получим:

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \tilde{p}_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где $\zeta_i = \frac{\tilde{c}_i}{2\tilde{m}_i\omega_i} = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$ — коэффициент демпфирования для i -ной формы колебания; ω_i — собственные частоты i -ной формы колебаний.

Для определения констант Рэлея необходимо задать эмпирические коэффициенты демпфирования для материала при двух наименьших собственных частотах и вычислить константы по формулам:

$$\alpha = \frac{2\zeta_i\zeta_j\omega_i\omega_j}{\zeta_i\omega_i + \zeta_j\omega_j}; \quad \beta = \frac{2\zeta_i\zeta_j}{\zeta_i\omega_i + \zeta_j\omega_j}. \quad (14)$$

Нетрудно видеть, что система уравнений (13) распадается на n независимые уравнения, каждое из которых определяет обобщенную координату $q_i(t)$, отвечающую i -ной форме колебаний.

Таким образом, задача построения решения уравнений движения системы с n степенями свободы сводится к решению задачи для линейной системы с одной степенью свободы, приведенному в работах [16, 17].

Решение уравнений (13) для обобщенных координат записывается в виде интеграла Дюамеля:

$$q_i(t) = \frac{P_{0i}}{m_i\omega_{ni}^2} \left\{ 1 + \frac{2\zeta_i}{t_r\omega_{ni}} \left[e^{-\zeta_i\omega_{ni}t} \cos\omega_{Di}t - e^{-\zeta_i\omega_{ni}(t-t_r)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 - e^{-\zeta_i\omega_{ni}t} \cos\omega_{Di}t) \right] \text{ при } 0 \leq t \leq t_r \right. \\ \left. - \frac{1-2\zeta_i^2}{t_r\omega_{Di}} \left[e^{-\zeta_i\omega_{ni}t} \sin\omega_{Di}t - e^{-\zeta_i\omega_{ni}(t-t_r)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin\omega_{Di}(t-t_r) \right] \text{ при } t > t_r \right\}. \quad (15)$$

Поставив (15) в выражение (6), получим искомый вектор узловых перемещений исследуемой подконструкции:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \varphi_i q_i(t) = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1k} \\ \varphi_{21} & \varphi_{21} & \dots & \varphi_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \dots & \varphi_{nk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{Bmatrix}. \quad (16)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные варианты моделирования динамических догрузений железобетонного каркаса многоэтажного здания, вызванных его структурной перестройкой с использованием метода декомпозиции и уровневых расчетных схем, позволяют выявлять параметры динамического отклика подконструкции, моделирующей зону возможного локального разрушения элементов каркаса здания при внезапном удалении одной из несущих конструкций в этой зоне.

Полученные аналитические зависимости для определения параметров динамического отклика рамно-стержневой конструктивной системы с конечным числом степеней свободы могут быть использованы для установления критериев особого предельного состояния при расчете защиты зданий от прогрессирующего обрушения при аварийных воздействиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lu X., Lin K., Li Y., Guan H., Ren P., Zhou Y. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario // Engineering Structures. 2017. Vol. 149. Pp. 91–103. DOI: 10.1016/J.ENG-STRUCT.2016.07.039
2. Pham A.T., Lim N.S., Tan K.H. Investigations of tensile membrane action in beam-slab systems under

progressive collapse subject to different loading configurations and boundary conditions // Engineering Structures. 2017. Vol. 150. Pp. 520–536. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.060

3. Jian H., Li S., Huanhuan L. Testing and analysis on progressive collapse-resistance behavior of RC frame substructures under a side column removal scenario // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2016.

Vol. 5. Issue 30. P. 04016022. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000873

4. *Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A.* Elastoplastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 2 (102). P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14

5. *Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н. и др.* О методах расчета напряженно-деформированного состояния на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитнооболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2018. Т. 14. № 2. С. 30–47. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47

6. *Бу Нгок Туен.* Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 4 (90). С. 73–84.

7. *Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.* Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 5. Pp. 1308–1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011

8. *Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.* Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 5. Issue 30. Pp. 1424–1438. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2007.08.011

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

10. *Травуш В.И., Федорова Н.В.* Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2017. № 1 (45). С. 21–28.

11. *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.

12. *Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П.* Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М. : Изд-во АСВ, 2004. 216 с.

13. *Бондарев Ю.В., Нгуен Т.С.* Расчет стержневых систем при внезапном удалении отдельных элементов // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010. № 4 (231). С. 43–48.

14. *Чернов Ю.Т., Петров И.А.* Определение эквивалентных статических сил при расчете систем с выключающимися связями // *Вестник МГСУ*. 2012. № 4. С. 98–101.

15. *Потапов А.Н.* Анализ колебаний конструкций с выключающимися связями // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2017. Т. 17. № 1. С. 38–48. DOI: 10.14529/build170105

16. *Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A.* Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. P. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040

17. *Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Dinh Quoc P., Medyanin M.* The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 052078. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052078

18. *Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A.* The effect of energy dissipation on the dynamic response of reinforced concrete structure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 962. P. 022063. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022063

19. *Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Iliushchenko T.* Determination of stiffness parameters of reinforced concrete structures using the decomposition method for calculating their survivability // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030. P. 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012078

20. *Барабаш М.С., Пикуль А.В.* Материальное демпфирование при расчете конструкций на динамические воздействия // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2017. Т. 13. № 3. С. 13–18.

Поступила в редакцию 7 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 22 октября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виталий Иванович Колчунов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений, академик РААСН; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; РИНЦ ID: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; asiorel@mail.ru;

Ву Нгок Туен — кандидат технических наук, преподаватель кафедры фундаментального образования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5948-4496, ORCID: 0000-0001-5755-8345; ngoctuyennd91@gmail.com;

Дмитрий Игоревич Нижегородов — студент; Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ); 141006, Московская область, г. Мытищи, Олимпийский пр-т, д. 50; 8255201@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Lu X., Lin K., Li Y., Guan H., Ren P., Zhou Y. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario. *Engineering Structures*. 2017; 149:91-103. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.07.039
2. Pha Pham A.T., Lim N.S., Tan K.H. Investigations of tensile membrane action in beam-slab systems under progressive collapse subject to different loading configurations and boundary conditions. *Engineering Structures*. 2017; 150:520-536. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.060
3. Jian H., Li S., Huanhuan L. Testing and Analysis on Progressive Collapse-Resistance Behavior of RC Frame Substructures under a Side Column Removal Scenario. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016; 5(30):04016022. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000873
4. Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A. Elastoplastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
5. Belostotskiy A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N. et al. About development of methods of analysis and assessment of vulnerability of spatial plate — shell reinforced concrete structures with allowance for physical non-linearities, crack formation and induced anisotropy. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(2):30-47. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47 (rus.).
6. Vu Ngoc Tuyen. Study of survivability of reinforced concrete constructive nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic formulation. *Building and Reconstruction*. 2020; 90(4):73-84. (rus.).
7. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*. 2008; 30(5):1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011
8. Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application. *Engineering Structures*. 2008; 5(30):1424-1438. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2007.08.011
9. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Vu Ngok Tuen. Experimental method of research of deformation of monolithic reinforced concrete building under accidental actions. *Building and Reconstruction*. 2018; 4(78):42-52. (rus.).
10. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017; 1(45):21-28. (rus.).
11. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. *Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts*. Moscow, ASV Publishing House, 2014; 208. (rus.).
12. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovskiy K.P. *Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design basis impacts*. Moscow, Association of Construction Universities, 2004; 216. (rus.).
13. Bondarev Yu.V., Nguen T.S. Calculation of rod systems with sudden removal of individual elements. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2010; 231(4):43-48. (rus.).
14. Chernov Yu.T., Petrov I.A. Identification of equivalent static forces as part of analysis of systems that have disruptable constraints. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 4:98-101. (rus.).
15. Potapov A.N. The analysis of structural oscillations with switch off connections. *Bulletin of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2017; 17(1):38-48. DOI: 10.14529/build170105 (rus.).
16. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 896:012040. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040
17. Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Dinh Quoc P., Medyankin M. The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering. 2020; 869:052078. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052078

18. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. The effect of energy dissipation on the dynamic response of reinforced concrete structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 962:022063. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022063

19. Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen Vu N., Iliushchenko T. Determination of stiffness parameters of

reinforced concrete structures using the decomposition method for calculating their survivability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012078. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012078

20. Barabash M.S., Pikul A.V. Material damping in dynamic analysis of structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3):13-18. (rus.).

Received October 7, 2021.

Adopted in revised form on October 20, 2021.

Approved for publication on October 22, 2021.

B I O N O T E S : **Vitaly I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Unique Buildings and Structures, Academician of RAASN; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040; Russian Federation; Chief Researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS)**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RISC: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; asiorel@mail.ru;

Vu Ngoc Tuyen — Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of of Fundamental Education; **Federal State Budgetary Educational Institution of the Higher Education “National research Moscow state construction university” (NIU MGSU)**; 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation; SPIN-code: 5948-4496, ORCID: 0000-0001-5755-8345; ngoctuyennd91@gmail.com;

Dmitriy I. Nizhegorodov — student; **Mytishchi branch of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 50 Olimpiyskiy prospect, Moscow region, Mytishchi, 141006, Russian Federation; 8255201@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов

Валерий Станиславович Лесовик^{1,2}, Роман Сергеевич Федюк³

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия;

² Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства
и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России);
г. Москва, Россия;

³ Дальневосточный федеральный университет (ДФУ); г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — расширение номенклатуры составов для специальных сооружений, что позволит осуществлять их эксплуатацию в экстремальных условиях. Для достижения поставленной цели решен ряд задач, содержащих пути повышения эффективности композитов, в том числе малопроницаемых.

Материалы и методы. Методика исследования включает систему трансдисциплинарных подходов, оценивающих композит, как сложную систему, с учетом положений геоники (геомиметики), таких как закон подобия, закон сродства структур, техногенный метасоматоз, а также микромеханику композиционных сред.

Результаты. Созданы цементные бетоны на композиционном вяжущем (КВ) для уникальных объектов: малопроницаемых (для защитных объектов, резервуаров и гидротехнических сооружений). Разработанные композиты имеют следующие эксплуатационные характеристики (в скобках даны результаты для контрольного образца): водопоглощение по массе — 2,5 % (6,1 %), марка по водонепроницаемости — W14 (W10), воздухопроницаемость — 0,0253 см³/с (0,0565 см³/с), паропроницаемость — 0,0021 мг/(м·ч·Па) (0,0030 мг/(м·ч·Па)), эффективный коэффициент диффузии — $1,34 \cdot 10^{-4}$ см²/с ($1,56 \cdot 10^{-4}$ см²/с).

Выводы. Доказано сходство в работе компонентов разных КВ, в том числе в ходе двухэтапной гидратации клинкерных минералов, в частности, на первой фазе происходит формирование разнофазных низкоплотных соединений, а на второй фазе — связывание гидроксида кальция в низкоосновные кристаллогидраты. Повышение активности КВ обусловлено синергетическим действием ряда причин: аморфные кремнеземсодержащие компоненты связывают Са(ОН)₂, выделяющийся при гидратации клинкерных минералов, в CSH(I) второй генерации; частицы известняка коагулируют поры, уплотняя структуру; а микросферы золы уноса являются центрами кристаллизации новообразований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цемент, композиционное вяжущее, бетон, композит, структурообразование, гидросиликаты кальция, проницаемость

Благодарности: 1. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-29-24113. 2. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации программы «Приоритет 2030» с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лесовик В.С., Федюк Р.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1346–1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356

Автор, ответственный за переписку: Роман Сергеевич Федюк, roman44@yandex.ru.

Increasing the performances of low permeable cement composites

Valery S. Lesovik^{1,2}, Roman S. Fediuk³

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation;

² Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services
of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation;

³ Far Eastern Federal University (FEFU); Vladivostok, Russky Island, Ajax, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is to expand the range of compositions for special structures, which will allow them to be operated in extreme conditions. To achieve this goal, a number of tasks have been solved containing ways to improve the efficiency of composites, incl. low-permeability ones.

Materials and methods. The research methodology includes a system of transdisciplinary approaches that evaluate the composite as a complex system, taking into account the provisions of geomimetics, such as the law of similarity, the law of affinity of structures, technogenic metasomatism, and micromechanics of composite media.

Results. A wide range of cement concretes has been created for unique objects: low-permeability (for protective objects, reservoirs and hydraulic structures). The developed composites have the following performance characteristics (the results for the control sample are given in parentheses): water absorption by weight — 2.5 % (6.1 %), waterproof grade — W14 (W10), air permeability — 0.0253 cm³/s (0.0565 cm³/s), vapor permeability — 0.0021 mg/(m·h·Pa) (0.0030 mg/(m·h·Pa)), effective diffusion coefficient — $1.34 \cdot 10^{-4}$ cm²/s ($1.56 \cdot 10^{-4}$ cm²/s).

Conclusions. The similarity in the work of the components of different composite binders, incl. During the two-stage hydration of clinker minerals, in particular, in the first phase, the formation of low-density compounds of different phases occurs, and in the second phase, the binding of calcium hydroxide to low-basic crystalline hydrates occurs. The increase in the activity of the composite binder is due to the synergistic effect of a number of reasons: amorphous silica-containing components bind Ca(OH)₂, released during the hydration of clinker minerals, in the second generation CSH(I); limestone particles clog the pores, compacting the structure; and fly ash microspheres are centers of crystallization of new growths.

KEYWORDS: portland cement, composite binders, concrete, composite, structure formation, calcium hydrosilicates, permeability

Acknowledgements: 1. This work was carried out within the framework of the RFBR grant No. 18-29-24113. 2. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the implementation of the "Priority 2030" programme using the equipment of the BTU BTU BTU IM. V.G. Shukhova.

FOR CITATION: Lesovik V.S., Fediuk R.S. Increasing the performances of low permeable cement composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1346-1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356 (rus.).

Corresponding author: Roman S. Fediuk, roman44@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные объекты представляют собой особый класс специальных зданий и сооружений, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях и, соответственно, возведенных из материалов с различными улучшенными эксплуатационными характеристиками. Многие строительные материалы для специальных и защитных сооружений достаточно исследованы, например, бетоны для ослабления радиоактивного излучения [1, 2], огнестойкие [3, 4] и жаростойкие [5, 6] композиционные материалы различного состава (цементные бетоны, геополимеры, материалы на основе серы) [7, 8].

Следует отметить, что в ряде случаев необходима разработка композитов, обладающих комплексом улучшенных эксплуатационных характеристик (рис. 1). Особенно актуально это для защитных сооружений, в которых нужно обеспечить комплексную защиту укрываемых людей от различных средств поражения: ударной волны, снарядов, огня, паров ядовитых жидкостей, газов.

Достижение синергетического эффекта работы материалов в конструкциях специальных сооружений достигается управлением структурообразованием композита с применением трансдисциплинарных положений строительного материаловедения: закона по-



Рис. 1. Целевые характеристики проектирования материалов для уникальных объектов

Fig. 1. Target design characteristics of materials for unique objects

добия [9, 10], закона сродства структур [11, 12], техногенного метасоматоза [13, 14] и микромеханики композиционных сред [15–17].

Согласно анализу мировой литературы [18–22], теоретическая база создания эффективных многокомпонентных вяжущих систем конструкционного назначения требует уточнения с использованием новых сырьевых ресурсов. В настоящее время складывается ситуация нехватки сырьевых ресурсов, истощения природных запасов, накопления огромного количества промышленных отходов. Известно, что наукоёмкость каждой отрасли науки зависит от скорости смены сырья, однако в строительной индустрии это достаточно медленный процесс [23–25]. Соответственно, необходимо расширение сырьевой базы различного генезиса, при этом особенно важно одновременно решать экологически важную задачу утилизации отходов.

Повышение эффективности цементных композитов для уникальных (защитных) объектов осуществляется, в том числе, в результате рационального подбора сырья с учетом подобия физико-механических и деформационных свойств, а также в проведении активации композиционной смеси. При этом механохимическая активация позволяет получить наиболее энергоэффективный материал, что положительно сказывается на оптимизации системы «человек – материал – среда обитания».

Отмечается необходимость дополнения теоретических основ создания малопроницаемых композитов для уникальных объектов с заранее заданными прогнозируемыми характеристиками с учетом трансдисциплинарных позиций, опираясь на фундаментальные представления о природе материальных систем, а также самоорганизацию синтезируемых композитов.

Таким образом, актуальна цель статьи — расширение номенклатуры составов для специальных сооружений, что позволит эксплуатировать их в экстремальных условиях. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, содержащих пути повышения эффективности малопроницаемых цементных композитов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных компонентов применялись портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (Спасскцемент), зола уноса (ЗУ) двух ТЭЦ Приморского края, отсеб дробления известняка поликарбоксилатный суперпластификатор Pantarhit PC 160, стальная анкерная фибра диаметром 1,2 мм и длиной 13 мм. Химический состав компонентов композиционного вяжущего приведен в табл.

Методика исследования включает систему трансдисциплинарных подходов, оценивающих композит, как сложную систему, с учетом положений геоники (геомиметики), таких как закон подобия, закон сродства структур, техногенный метасоматоз. Кроме того, создание высокоплотных упаковок выполнено с учетом положений микромеханики композиционных сред. Осуществлено управление структурообразованием цементных композитов на разномасштабных уровнях с различными заданными эксплуатационными характеристиками, что позволит разрабатывать материалы для уникальных объектов. Физико-химические свойства исходного сырья и эксплуатационные характеристики синтезируемых композитов исследованы комплексом современных методов, включающих рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеновскую дифракцию, термогравиметрию, дифференциально-термический анализ, лазерную гранулометрию и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование пористой структуры цементных материалов производится с учетом системы капиллярных пор, отвечающих за водопроницаемость, однако до настоящего времени отсутствует единое представление данной модели. В этом исследовании принята модель С.А. Королева [26], которая представляет собой систему сообщающихся микрокапилляров в межкристаллитных промежутках (рис. 2).

Уплотнение микроструктуры и, соответственно, снижение водо-, газо- и паропроницаемости композитов достигается в результате снижения поровой

Химический состав компонентов композиционного вяжущего

The chemical composition of the components of the composite binder

Материал / Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO _{св} CaO _{free}	п.п.п. LOI
Цемент / Cement	66,2–67	20,2–20,9	6,0–6,7	3,5–4,0	1,4–2,0	До 1,2	0,18
ЗУ Владивостокской ТЭЦ Fly ash Vladivostok CHP	3,4	63,0	21,4	7,5	2,1	0,4	1,4
ЗУ Артемовской ТЭЦ Fly ash Artemovskaya CHP	9,7	48,1	29,3	6,5	1,8	0,1	0,6
Известняк / Limestone	47,2	–	0,1	0,6	0,1	–	50,6

составляющей (капиллярных пор) материала с учетом положений техногенного метасоматоза. Для этого была запроецирована линейка композиционных вяжущих (КВ), включающих в качестве исходных компонентов портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, ЗУ и отсев дробления известняка (рис. 3).

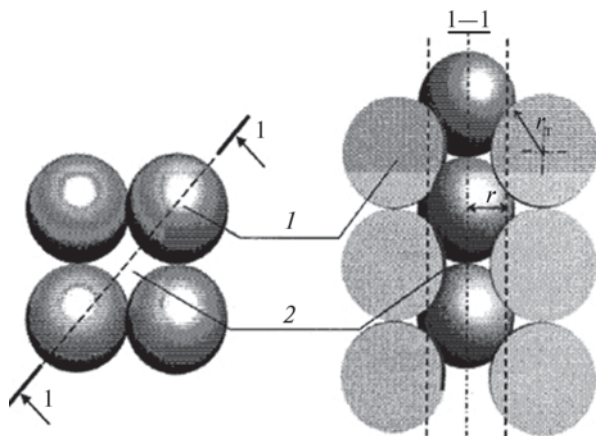


Рис. 2. Принятая модель системы капиллярных пор:
1 — гидратное образование; 2 — капиллярный канал
Fig. 2. The adopted model of the capillary pore system:
1 — hydration formation; 2 — capillary canal

Для расширения применимости КВ исследовалось влияние на синтезируемый композит двух различных ЗУ дальневосточных ТЭЦ. Сырьевые компоненты были совместно измельчены до достижения удельной поверхности $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ в варио-планетарной мельнице, что является более эффективной технологией механоактивации по сравнению с шаровой и вибрационной мельницами (рис. 4). Это связано с обеспечением синергетического действия центробежных ударных и истирающих воздействий на диспергируемый материал, что способствует повышению активности более чем в 2 раза. На рис. 3 условно не показан поликарбоксилатный суперпластификатор (0,3 % от массы КВ), не входящий в состав КВ, и поэтому не подвергшийся измельчению. Это объясняется органической структурой пластифицирующей добавки, которая при высоких температурах в мельнице будет выгорать.

Повышение активности композиционного вяжущего обусловлено синергетическим действием ряда причин: аморфные кремнеземсодержащие компоненты связывают гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации клинкерных минералов, в низкоосновные гидросиликаты кальция второй генерации; частицы известняка коагулируют поры, уплотняя структуру;

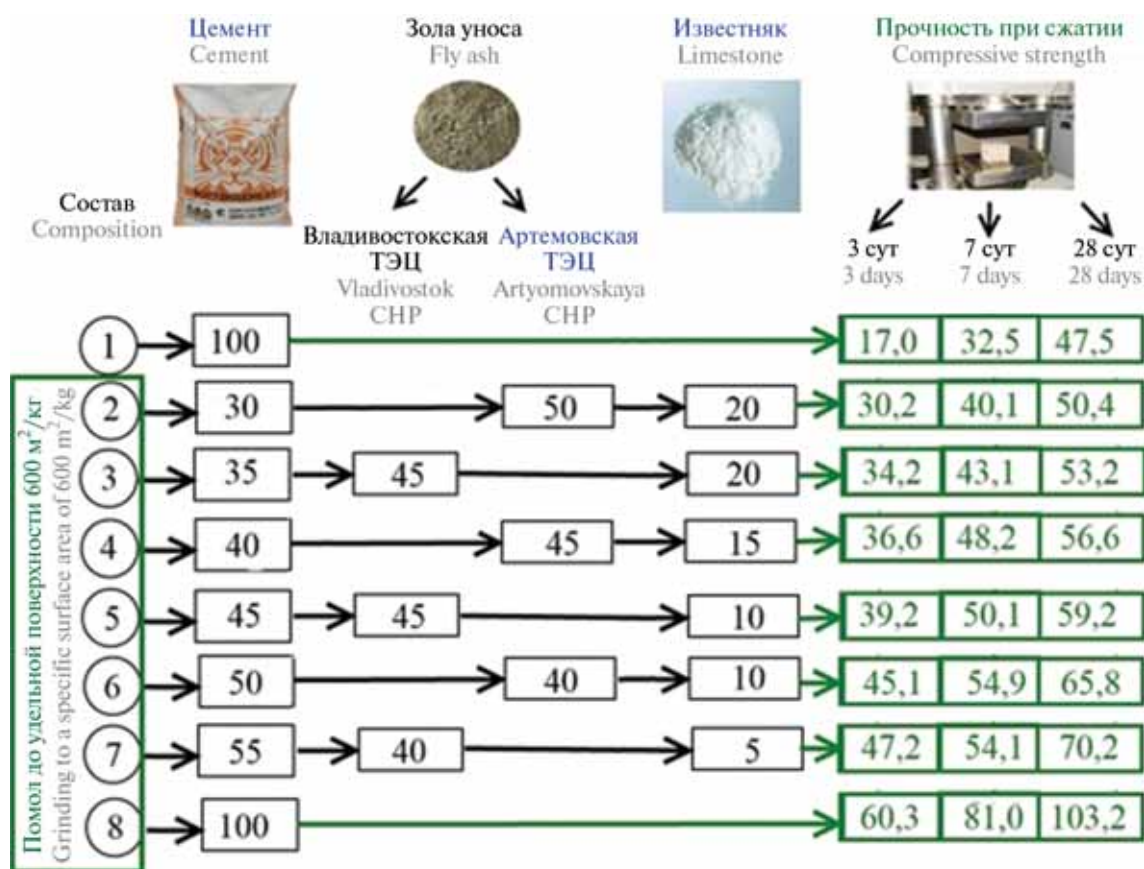


Рис. 3. Разработанная номенклатура композиционных вяжущих повышенной непроницаемости

Fig. 3. The developed nomenclature of composite binders with increased impermeability

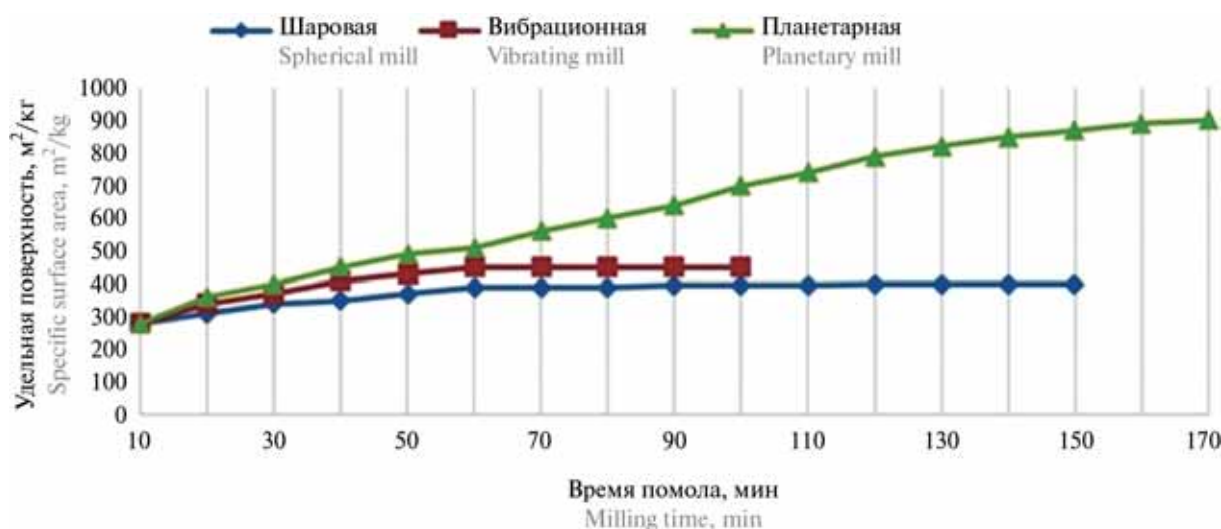


Рис. 4. Зависимость тонкости помола вяжущего от продолжительности измельчения

Fig. 4. Dependence of the fineness of the grinding of the binder on the it duration

а микросферы ЗУ являются центрами кристаллизации новообразований.

Сравнение рентгенограмм цементного камня на КВ и контрольном цементе показывает более полную гидратацию клинкерных минералов в модифицированном образце (рис. 5). Отмечено повышение пиков низкоосновных гидросиликатов кальция при снижении отражений клинкерных минералов. С другой стороны, в контрольном образце отмечаются повышенные пики $\text{Ca}(\text{OH})_2$, снижающие его прочность.

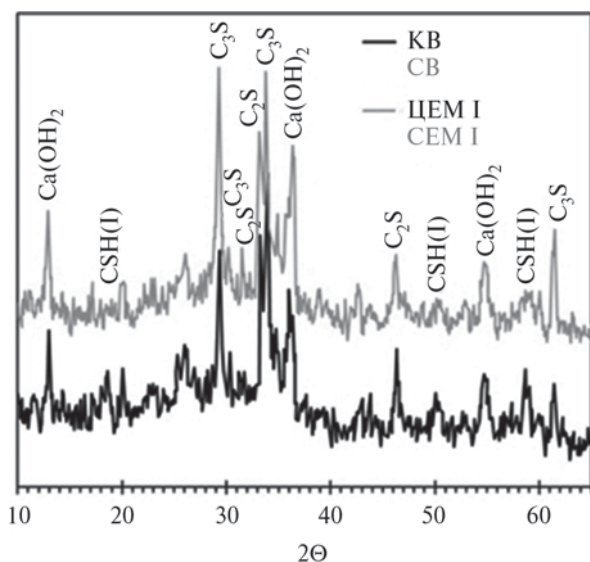


Рис. 5. Сравнение фазового состава затвердевших образцов в возрасте 28 сут

Fig. 5. Comparison of the phase composition of solidified samples at the age of 28 days

Это же подтверждается микроструктурой образцов, в частности, в модифицированных образцах отмечается более плотная структура новообразова-

ний по сравнению с контрольным образцом (рис. 6). Композиционная матрица (рис. 6, b) представляет собой однородную структуру с низкой микропористостью с преобладанием низкоосновных гидросиликатов кальция и этtringитоподобных фаз.

Изменение фазового состава со смещением баланса в сторону гидросиликатных фаз также подтверждается результатами дифференциально-термического анализа; прослеживаются два основных эндотермических пика. Первый эндотермический эффект при температуре 160 °C вызван удалением воды из гидросиликатного геля, а второй эффект при температуре 475 °C соответствует дегидратации гидроксидов кальция (рис. 7).

С другой стороны, увеличение площади этого пика на термограмме контрольного образца показывает наличие большего количества портландита, оказывающего ослабляющее действие на цементный камень. Активный аморфный кремнезем, находящийся в составе КВ, связывает $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющийся при гидратации клинкерных минералов в гидросиликаты кальция второй генерации, что видно из рис. 5–7, механизм действия представлен на рис. 8.

Создающееся таким образом уплотнение структуры в единице объема позволяет обеспечивать повышение плотности, а следовательно, прочности и непроницаемости до достижения некоторого предельного насыщения, когда чрезмерное содержание наполнителя КВ не станет закрывать поверхность новообразований, препятствуя образованию контактов между ними и срастанию кристаллогидратов в агломераты. Соответственно, выявлено наличие оптимального количества кремнеземсодержащих компонентов КВ, которое будет зависеть от их пуццолановой активности. Установлено, что необходимое количество карбонатсодержащего микронаполнителя зависит от требуемого количества частиц для коагуляции капиллярных пор.

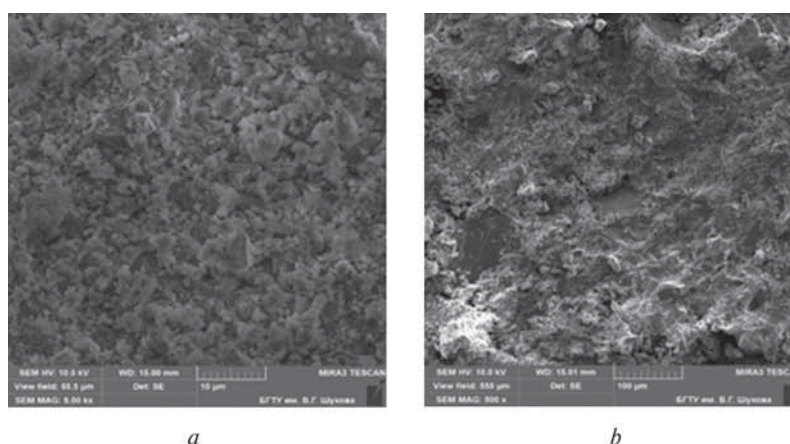


Рис. 6. Сравнение морфологических особенностей образцов: *a* — контрольный образец; *b* — на основе КВ
Fig. 6. Comparison of the morphological features of the samples: *a* — control sample; *b* — based on composite binder (CB)

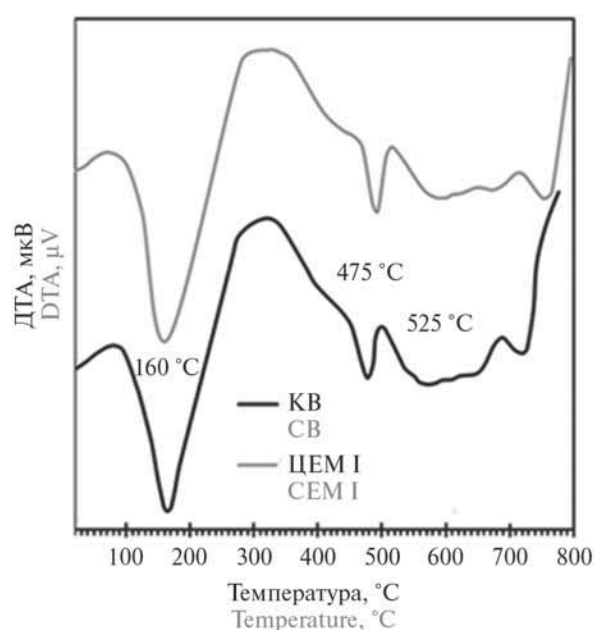


Рис. 7. Сравнение термогравиметрических кривых
Fig. 7. Comparison of thermogravimetric curves

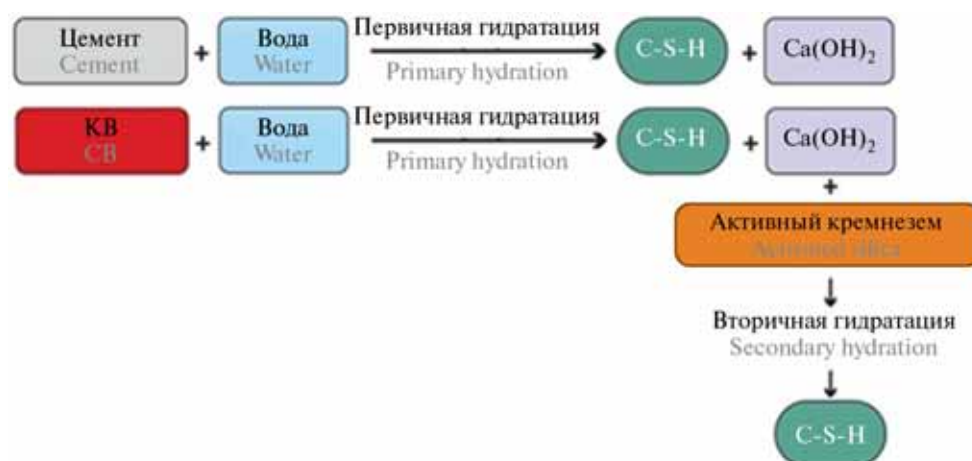


Рис. 8. Схематичное изображение механизмов гидратации цемента и КВ
Fig. 8. Schematic representation of the mechanisms of cement hydration and CB

Разработанные бетоны на основе КВ с применением портландцемента, ЗУ, известняка, механоактивированных до удельной поверхности $600 \text{ м}^2/\text{кг}$, с добавлением 1,2 кг суперпластификатора пятого поколения, мелкого заполнителя и стальной анкеро-ванной фибры, имеют характеристики прочности при сжатии выше 100 МПа. Достижение столь высоких показателей физико-механических свойств возможно благодаря совместному действию следующих причин: уменьшению процентного содержания капиллярных пор, образованию кристаллогидратов второй генерации в результате пуццолановой реакции компонентов КВ, заполнению порового пространства на различных масштабных уровнях с одновременным созданием плотной упаковки зерен на макроуровне (рис. 9).

Создается более плотная поровая структура, в частности, крупных макрокопических пор присутствует менее 1 % (рис. 10). Капиллярная и макрокопическая пористость снижается более чем в 3 раза, а возросшее количество гелевых пор свидетельствует о повышенном количестве гидратных новообразований в единице объема; гелевые поры не способны пропускать молекулы воды, что положительно сказывается на непроницаемости разработанных композитов. Таким образом, добавка ЗУ и известнякового микрозаполнителя, снижая пористую составляющую композита, положительно влияет на воздухо- и водопроницаемость, что является важным аспектом материалов для защитных сооружений, а также для широкого спектра объектов гражданского назначения: гидротехнических, резервуаров и др.

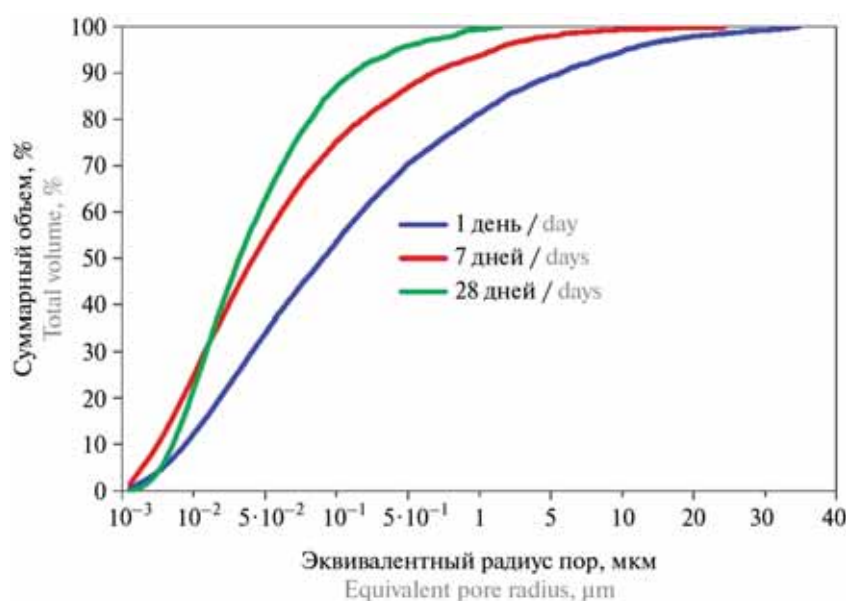


Рис. 9. Кривые размеров пористости композита в разные сроки твердения

Fig. 9. Curves of the dimensions of the porosity of the composite at different times of hardening

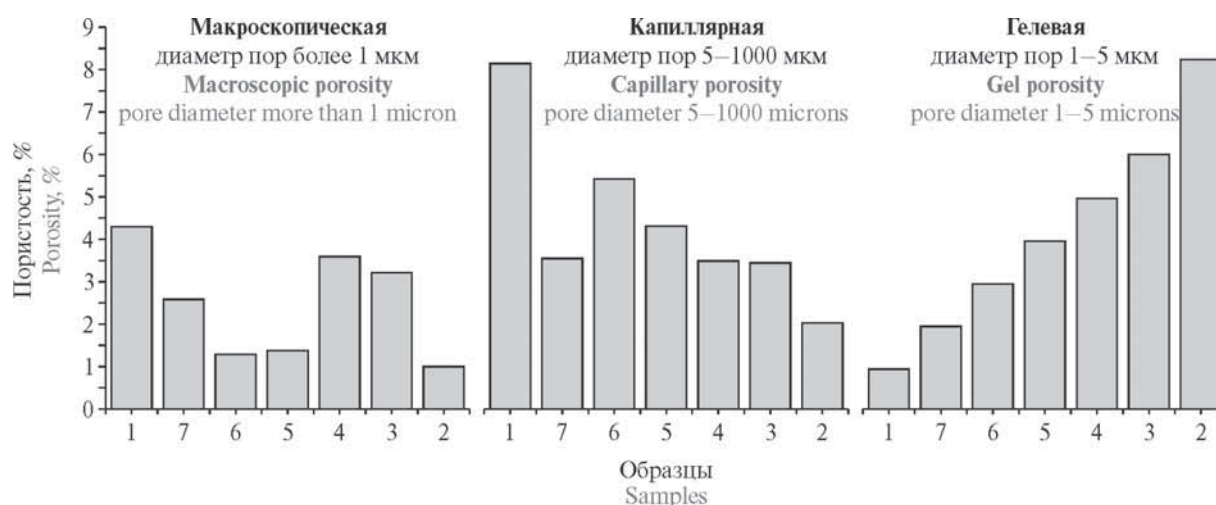


Рис. 10. Распределение классов пористости в зависимости от вида КВ

Fig. 10. Distribution of porosity classes depending on the type of the CB

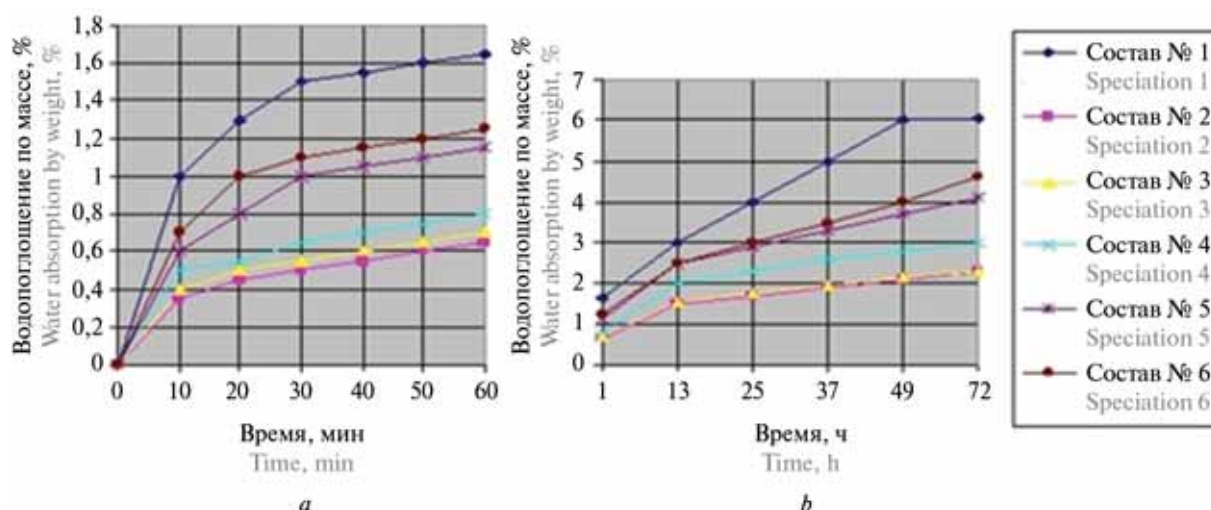


Рис. 11. Динамика водопоглощения бетона в течение: *a* — одного часа; *b* — трех суток

Fig. 11. Dynamics of water absorption of concrete during: *a* — 1 hour; *b* — 3 days

Разработанные композиты имеют следующие эксплуатационные характеристики (в скобках даны результаты для контрольного образца): водопоглощение по массе — 2,5 % (6,1 %), марка по водонепроницаемости — W14 (W10), воздухопроницаемость — $0,0253 \text{ см}^3/\text{с}$ ($0,0565 \text{ см}^3/\text{с}$), паропроницаемость — $0,0021 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ ($0,0030 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$), эффективный коэффициент диффузии — $1,34 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ($1,56 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$).

Крайне низкое значение водопоглощения также напрямую зависит от процентного содержания капиллярных пор (рис. 11).

Низкая проницаемость композита доказывает повышение коррозионной стойкости, что является важным для конструкций специальных сооружений, особенно, имеющих в своем составе кислые золы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приведены теоретические представления структурообразования цементных композитов широкого спектра функционального назначения, которые могут применяться для возведения ответственных конструктивных элементов при строительстве уникальных объектов. Данные теоретические предложения

опираются на фундаментальные основы трансдисциплинарной науки геоники (геомиметики), в частности закон сродства структур, закон подобия, техногенный метасоматоз, а также микромеханику композиционных сред.

Созданные цементные фибробетоны для малопроницаемых уникальных объектов (резервуаров и гидротехнических сооружений) имеют улучшенные физико-механические свойства (прочность при сжатии выше 100 МПа), а также сниженные характеристики газо-, водо- и паропроницаемости.

Доказано сходство в работе компонентов разных КВ, в том числе в ходе двухэтапной гидратации клинкерных минералов, в частности, на первой фазе происходит формирование разнофазных низкоплотных соединений, а на второй фазе — связывание гидроксида кальция в низкоосновные кристаллогидраты. Повышение активности КВ обусловлено синергетическим действием ряда причин: аморфные кремнеземсодержащие компоненты связывают $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющийся при гидратации клинкерных минералов, в CSH(I) второй генерации; частицы известняка кольматируют поры, уплотняя структуру; а микросферы ЗУ являются центрами кристаллизации новообразований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Палеотип, 2006. 272 с.
2. Han B., Zhang L., Ou J. Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures. New

York: Springer, 2017. 432 p. DOI: 10.1007/978-981-10-4349-9

3. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // Строительные материалы. 2002. № 6. С. 2–5.

4. Hager I., Sitarz M., Mróz K. Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application — Effect of slag addition // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 316. P. 128168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128168
5. Jihui Zhao, Liangyu Tong, Boen Li, Tianhao Chen, Chunpeng Wang, Gangqiang Yang et al. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 307. P. 127085. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127085
6. Chunlong Huang, Zirui Cheng, Jihui Zhao, Yiren Wang, Jie Pang. The influence of water reducing agents on early hydration property of ferrite aluminate cement paste // *Crystals*. 2021. Vol. 11. Issue 7. P. 731. DOI: 10.3390/cryst11070731
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. Танг В.Л., Нго С.Х., Ву К.З., 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. 17–37. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2
9. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 9–16. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.9-16
10. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с.
11. Чулкова И.Л. Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур // *Вестник СибАДИ*. 2012. № 6 (28). С. 83–87.
12. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 3–2. С. 267–271.
13. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 100–106. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106
14. Лесовик В.С., Володченко А.А. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 4. С. 38–41.
15. Vandamme M., Ulm F.-J. Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 52. Pp. 38–52. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.05.006
16. Chuanlin Hu, Yueyi Gao, Yamei Zhang, Zongjin Li. Statistical nanoindentation technique in application to hardened cement pastes: Influences of material microstructure and analysis method // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113. Pp. 306–316. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.064
17. Da Silva W.R.L., Němeček J., Štemberk P. Methodology for nanoindentation-assisted prediction of macroscale elastic properties of high performance cementitious composites // *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 45. Pp. 57–68. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.013
18. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review // *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2. Issue 2. Pp. 152–157. DOI: 10.12720/ijmse.2.2.152-157
19. John E., Matschei T., Stephan D. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate — A review // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 113. Pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.003
20. Blanco-Varela M.T., Carmona-Quiroga P.M., Sáez del Bosque I.F., Martínez-Ramírez S. Role of organic admixtures on thaumasite precipitation // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Issue 7. Pp. 994–1000. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.020
21. Foley E.M., Kim J.J., Reda Taha M.M. Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Issue 9. Pp. 1225–1232. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.05.014
22. Chuanlin Hu, Yunge Han, Yueyi Gao, Yamei Zhang, Zongjin Li. Property investigation of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) gel in cementitious composites // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 95. Pp. 129–139. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.06.012
23. Němeček J., Králík V., Vondřejc J. Micro-mechanical analysis of heterogeneous structural materials // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 36. Pp. 85–92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.015
24. Li Y., Liu Y., Wang R. Evaluation of the elastic modulus of concrete based on indentation test and multi-scale homogenization method // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. P. 102758. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102758
25. Potapov V., Fediuk R., Gorev D. Hydrothermal SiO₂ nanopowders: Obtaining them and their characteristics // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. Issue 4. P. 624. DOI: 10.3390/nano10040624
26. Королев С.А. О новом подходе в математическом прогнозировании водонепроницаемости цементных композитов // *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 25. С. 31–36.

Поступила в редакцию 31 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Валерий Станиславович Лесовик** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; **Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России)**; 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 29; РИНЦ ID: 111244, Scopus: 55887733300, ResearcherID: A-4757-2016, ORCID: 0000-0002-2378-3947; naukavs@mail.ru;

Роман Сергеевич Федюк — кандидат технических наук, доцент, профессор военного учебного центра; **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; РИНЦ ID: 635540, Scopus: 57199850188, ResearcherID: N-6730-2017, ORCID: 0000-0002-2279-1240; roman44@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Korolev E.V., Proshin A.P., Bazhenov Yu.M., Sokolova Yu.A. *Radiation-protective and corrosion-resistant sulfur building materials*. Moscow, Paleotip, 2006; 272. (rus.).
2. Han B., Zhang L., Ou J. *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. New York, Springer, 2017; 432. DOI: 10.1007/978-981-10-4349-9
3. Strahov V.L., Garashchenko A.N. Fire protection of building structures: modern means and methods of optimal design. *Building Materials*. 2002; 6:2-5. (rus.).
4. Hager I., Sitarz M., Mróz K. Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application — Effect of slag addition. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 316:128168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128168
5. Jihui Zhao, Liangyu Tong, Boen Li, Tianhao Chen, Chunpeng Wang, Gangqiang Yang et al. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 307:127085. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127085
6. Chunlong Huang, Zirui Cheng, Jihui Zhao, Yiren Wang, Jie Pang. The influence of water reducing agents on early hydration property of ferrite aluminate cement paste. *Crystals*. 2021; 11(7):731. DOI: 10.3390/cryst11070731
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. Tang V.L., Ngo X.H., Vu K.D., Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Aleksandrova O.V. Geopolymer concrete made using large-tonnage technogenic waste. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):17-37. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2 (rus.).
9. Lesovik V.S. Construction materials. The present and the future. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12:1(100):9-16. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.9-16 (rus.).
10. Lesovik V.S. *Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science*. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2016; 287. (rus.).
11. Chulkova I.L. Structural formation of building composites based on the principle of structural affinity. *Bulletin of the Siberian State Automotive and Road Academy*. 2012; 6:83-87. (rus.).
12. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Chulkova I.L. Law affinity structures in materials science. *Basic Research*. 2014; 3-2:267-271. (rus.).
13. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatism in construction material science. *Building Materials*. 2019; 1-2:100-106. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106 (rus.).
14. Lesovik V.S., Volodchenko A.A. On the problem of technogenic metasomatism in building materials science. *Bulletin OF BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2015; 4:38-41. (rus.).
15. Vandamme M., Ulm F.-J. Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*. 2013; 52:38-52. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.05.006
16. Chuanlin Hu, Yueyi Gao, Yamei Zhang, Zongjin Li. Statistical nanoindentation technique in application to hardened cement pastes: Influences of material microstructure and analysis method. *Construction and Building Materials*. 2016; 113:306-316. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.064
17. Da Silva W.R.L., Němeček J., Štemberk P. Methodology for nanoindentation-assisted prediction of macroscale elastic properties of high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2014; 45:57-68. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.013

18. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review. *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2014; 2(2):152-157. DOI: 10.12720/ijmse.2.2.152-157
19. John E., Matschei T., Stephan D. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate — A review. *Cement and Concrete Research*. 2018; 113:74-85. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.003
20. Blanco-Varela M.T., Carmona-Quiroga P.M., Sáez del Bosque I.F., Martínez-Ramírez S. Role of organic admixtures on thaumasite precipitation. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(7):994-1000. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.020
21. Foley E.M., Kim J.J., Reda Taha M.M. Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(9):1225-1232. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.05.014
22. Chuanlin Hu, Yunge Han, Yueyi Gao, Yamei Zhang, Zongjin Li. Property investigation of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) gel in cementitious composites. *Materials Characterization*. 2014; 95:129-139. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.06.012
23. Němeček J., Králík V., Vondřejc J. Micromechanical analysis of heterogeneous structural materials. *Cement and Concrete Composites*. 2013; 36:85-92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.015
24. Li Y., Liu Y., Wang R. Evaluation of the elastic modulus of concrete based on indentation test and multi-scale homogenization method. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:102758. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102758
25. Potapov V., Fediuk R., Gorev D. Hydrothermal SiO₂ nanopowders: Obtaining them and their characteristics. *Nanomaterials*. 2020; 10(4):624. DOI: 10.3390/nano10040624
26. Korolev S.A. On a new approach in the mathematical prediction of the waterproofing of cement composites. *Bulletin of SUSU*. 2008; 25:31-36. (rus.).

Received July 31, 2021.

Adopted in revised form on October 28, 2021.

Approved for publication on October 28, 2021.

B I O N O T E S : **Valery S. Lesovik** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; **Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation**; 29 Vernadsky pr., Moscow, 119331, Russian Federation; ID RISC: 111244, Scopus: 55887733300, ResearcherID: A-4757-2016, ORCID: 0000-0002-2378-3947; naukavs@mail.ru;

Roman S. Fediuk — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Military Training Center; **Far Eastern Federal University (FEFU)**; 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; ID RISC: 635540, Scopus: 57199850188, ResearcherID: N-6730-2017, ORCID: 0000-0002-2279-1240; roman44@yandex.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

RESEARCH PAPER

UDC 666.97

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362

Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi

Emmanuel Mikerego, Nestor Niyonzima, Jean Claude Ntirampeba

University of Burundi; Bujumbura, Burundi

ABSTRACT

Introduction. The article is about an assessment of the impact of impurities contained in the local construction materials on the mechanical characteristics of the concrete used in reinforced concrete structures in Burundi.

Materials and methods. The methodology of the study consisted in varying the quantity of impurities for the manufacturing of the concrete experimental cubic samples. The grain sizes of the studied ordinary concrete were in the favourable zones according to the recommended granulometry for standard concretes. Simulation of impurities was made by adding in the mixing water solid particles taken from a local rock called "red earth". The particles were composed by (24 %) of clays, (38 %) of silts and (38 %) of sands. As for the used cement in this study, it was the type CEM I (32.5). The quantities of impurities were expressed in grams per litre of mixing water (g/l) and were varying from (0 g/l) to (100 g/l) with a step of (20 g/l). The prepared experimental concrete samples were stored in the laboratory of materials at the University of Burundi and were subjected to compression testing under hydraulic press after 28 days.

Results. The impact of impurities consisting of (24 %) of clays, (38 %) of silts and (38 %) of sands is identified. Each increase of (20 g) of impurities in a litre of mixing water induces an average decrease of (4 %) on the compressive strength and the Young's modulus for an ordinary concrete.

Conclusions. The impact of impurities contained in the local construction materials used in the manufacturing of the concrete for reinforced concrete structures in Burundi is studied. Each increase of (20 g) of impurities in a litre of mixing water induces an average decrease of (4 %) on the compressive strength and the Young's modulus of an ordinary concrete. For Burundi, a curve for the approximation of the bearing capacity of the concrete used in reinforced concrete structures according to the quantity of impurities contained in the local construction materials was established. Hence, it is advisable to start by the specification of the quantity of impurities contained in the construction materials before making the concrete for reinforced concrete structures in order to predict the mechanical performances of the concrete used in reinforced concrete structures.

KEYWORDS: impurities, local construction materials in Burundi, reinforced concrete structures

FOR CITATION: Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1357-1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362

Corresponding author: Mikerego Emmanuel, mikeregoemmanuel@hotmail.com.

Влияние примесей местных строительных материалов на несущую способность бетона, используемого в составе конструкций на территории Бурунди

Эммануэль Микерего, Нестор Нийонзима, Жан Клод Нтирампеба

Университет Бурунди; г. Бужумбура, Бурунди

АННОТАЦИЯ

Введение. Оценивается влияние примесей местных строительных материалов на механические характеристики бетона, используемого для изготовления железобетонных конструкций в Бурунди.

Материалы и методы. Методика исследования заключается в изменении количества примесей при экспериментальном изготовлении образцов бетона кубической формы. Размеры зернистого заполнителя изучаемого стандартного бетона не должны выходить за пределы рекомендованных значений для гранулометрического состава стандартных бетонов. Моделирование примесей осуществлялось путем введения в воду затворения твердых частиц местной породы под названием «красная земля». В состав частиц примесей входят глины (24 %), ил (38 %) и песок (38 %). Использовался цемент марки CEM I (32,5). Количество примесей выражалось в граммах на литр воды затворения (г/л) и варьировалось от 0 до 100 г/л с шагом в 20 г/л. Приготовленные экспериментальные образцы бетона хранились в лаборатории материалов Университета Бурунди и по истечении 28 суток подвергались испытаниям на сжатие с помощью гидравлического пресса.

Результаты. Установлено влияние примесей, в состав которых входят глины (24 %), ил (38 %) и песок (38 %). Каждый раз с ростом количества примесей на 20 г на литр воды затворения сокращается прочность стандартного бетона на сжатие в среднем на 4 %, а также падает значение модуля Юнга.

Выводы. Начерчена кривая приблизительной величины несущей способности бетона, применяемого для изготовления железобетонных конструкций, в зависимости от количества примесей в составе местных строительных материалов. Перед началом изготовления бетона, предназначенного для железобетонных конструкций, следует указывать количество примесей в составе строительных материалов для обеспечения возможности прогнозирования механических показателей бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: примеси, местные строительные материалы из Бурунди, железобетонные конструкции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Микерего Э., Нийонзима Н., Нтирампеба Ж.К. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1357–1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362

Автор, ответственный за переписку: Эммануэль Микерего, mikeregoemmanuel@hotmail.com.

INTRODUCTION

In Burundi, the local construction materials are not generally washed before being used in the manufacturing of the concrete for reinforced concrete structures. The materials are generally river-borne and quarries. Even the mixing water used is usually taken from rivers. As an example, in the large city of Burundi, Bujumbura, various rivers flowing through the city are the main sources of construction materials and mixing water. Therefore, the sources of construction materials make them contain impurities. For example, the quantity of impurities depends on the rainfall and the exploitation of the catchment areas throughout the year for river aggregates [1–4].

Foreign literature [5–8] show that the impurities contained in the construction materials for concrete have an impact on the mechanical characteristics of the concrete made for the reinforced concrete structures. Except the known effect of the water/cement ratios on the compressive strength of the concrete [9], is also known that the impurities contained in the construction materials make worse the mechanical characteristics of the concrete used in the reinforced concrete structures. In [10–12], the source and quality of the mixing water used were found to have an impact on the mechanical performances of the concrete. The impact of impurities contained in sea, ocean and waste water on the mechanical properties of the concrete used in structures is confirmed in [13–19].

Although there are studies on the impact of impurities contained in the construction materials in foreign literature, in Burundi, the impact of impurities contained in the local construction materials on the concrete used in reinforced concrete structures is unknown.

MATERIALS AND METHODS

In this paper, the studied impurities come from the aggregates used during the fabrication of the concrete for structures in Burundi. However, the study does not exclude that the impurities may also come from the mixing water used. In this study, the guiding hypothesis is that the impurities contained in the aggregates always

end up suspended in the mixing water whether it is clean or not.

Thus, the methodology of the study consists in varying the quantity of impurities in the mixing water used for the manufacturing of the experimental concrete cubic ($10 \times 10 \times 10$ cm) samples. The concrete studied is the ordinary with fine and coarse aggregates from the Ntahangwa River. The sizes of the grain aggregates were in the favourable zones according to the recommended granulometry for the standard concrete.

If expressed per cubic metre, the concrete was made from (207 litre) of water, (400 kg) of cement, (590 kg) of sand and (1169 kg) of gravel. As for the particles simulating the impurities in the mixing water, they were taken from a local rock called “red earth” from Karama in the commune of Isare in Bujumbura province. These impurities were classified as silt nature as indicated by the reading on the Taylor triangular chart used in the classification of the nature of soils. They were composed by (24 %) of clays, (38 %) of silts and (38 %) of sands, as shown by the Casagrande sedimentation particle size analysis. In addition, the cement used in this study was of the type CEM I (32.5).

The quantities of impurities were expressed in grams per litre of mixing water (g/l) and they were varying from (0 g/l) to (100 g/l) with a step of (20 g/l). For each experimental design, nine (9) samples of experimental concrete were prepared (Fig. 1).

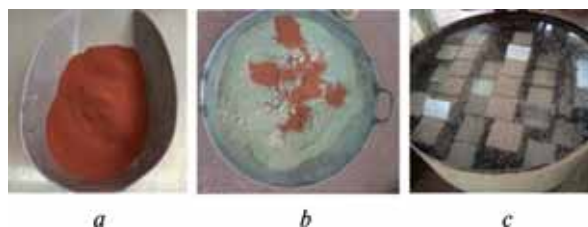


Fig. 1. The powder simulating impurities (a) and the concrete mix design (b) for the preparation of the experimental concrete samples (c) in the laboratory

The prepared experimental concrete samples were stored in the laboratory of materials at the University of Burundi and were subjected to compression testing under an hydraulic press after 28 days (Fig. 2).



Fig. 2. The experimental concrete samples (a) and the process of crushing an experimental concrete sample (b) under an hydraulic press in the laboratory

The results from the experimental tests were collected in tables designed to allow an easy analysis and

discussion. For the facilitation of the interpretation, the obtained results were limited to the quantity of (220 g) of impurities in a litre of mixing water.

RESULTS OF THE RESEARCH

In this study, it was understood that the studied impurities come from the aggregates and water carried by the rivers or from the quarries. Compression tests applied on the experimental concrete samples show that the studied impurities decrease significantly the compressive strength of the concrete (Fig. 3).

The increase of impurities in the construction materials makes worse the mechanical characteristics of the concrete. Each variation of 20 grams of impurities contained in a litre of mixing water induces an average decrease of (4 %) in the compressive strength of an ordinary concrete (Fig. 4).

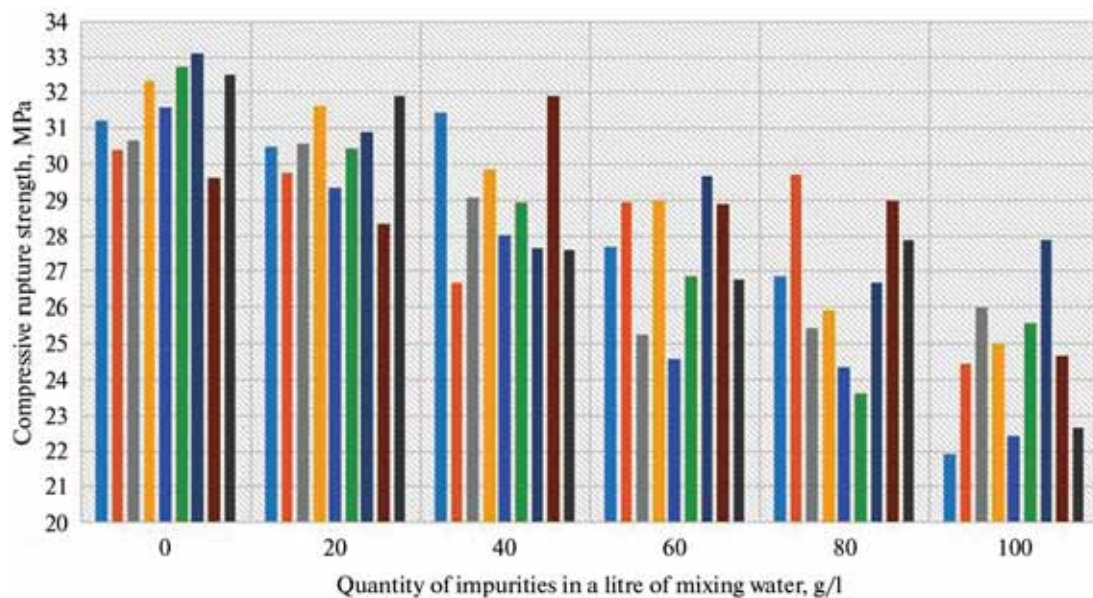


Fig. 3. Results of the compression tests applied on the experimental concrete samples under the hydraulic press

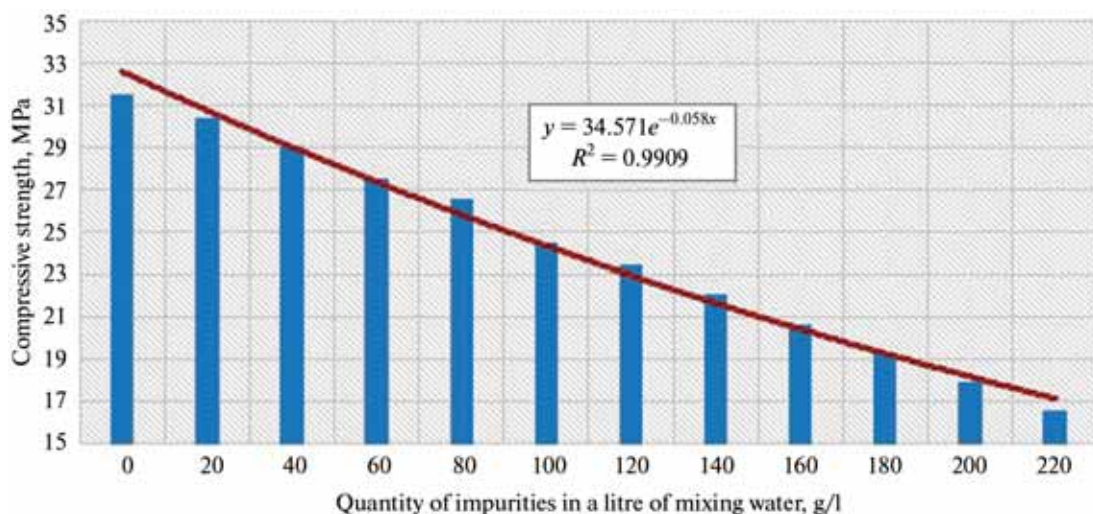


Fig. 4. Diagram of the decrease of the compressive strength for an ordinary concrete due to impurities contained in the constituents materials

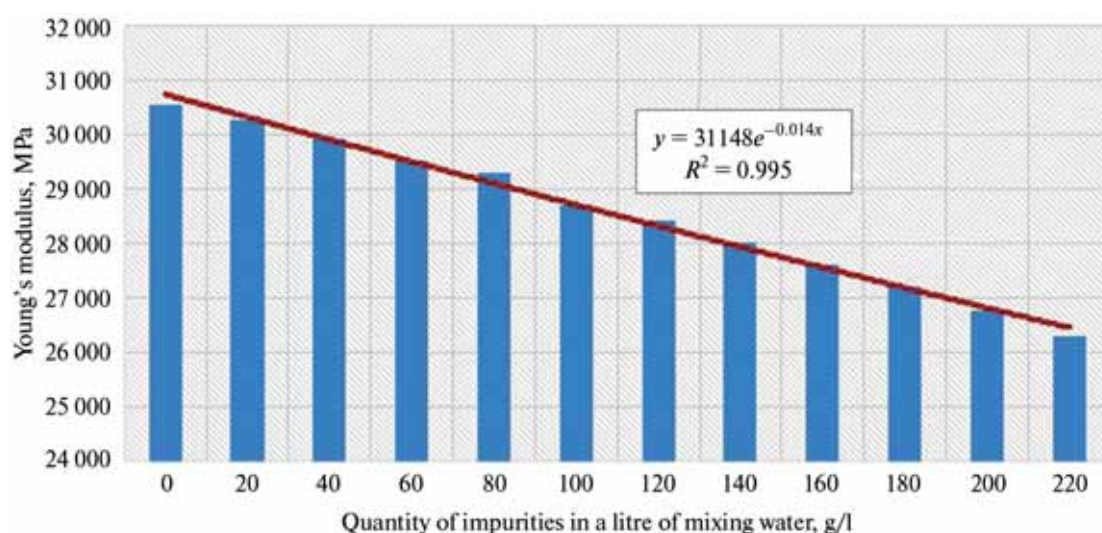


Fig. 5. Diagram of the decrease of Young's modulus for an ordinary concrete due to impurities contained in the constituents materials

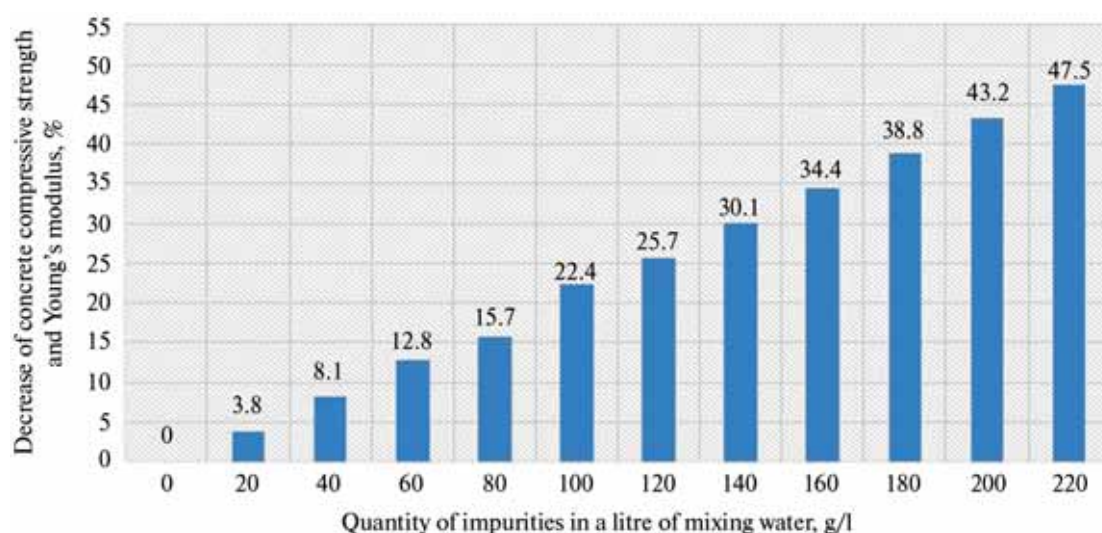


Fig. 6. Diagram of the decrease of the bearing capacity of the concrete of the reinforced concrete structures according to the quantity of impurities contained in the local construction materials in Burundi

Similarly, each variation of 20 grams of impurities contained in a litre of mixing water induces an average decrease of (4 %) of the Young's modulus for an ordinary concrete (Fig. 5).

Finally, the obtained results show the decrease in percentage of the bearing capacity of the concrete of reinforced concrete structures due to the impurities contained in the local construction materials in Burundi (Fig. 6).

CONCLUSION AND DISCUSSION

In this study, the impact of impurities contained in the local construction materials in Burundi are simulated and evaluated. The studied impurities consisted of (24 %)

of clays, (38 %) of silts and (38 %) of sands. Each increase of (20 g) of impurities in a litre of mixing water was found to induce an average decrease of (4 %) on the compressive strength and the Young's modulus for an ordinary concrete. For Burundi, a curve for the approximation of the bearing capacity of the concrete used in reinforced concrete structures in function of the quantity of impurities contained in local construction materials was established. Hence, it is advisable to start by the specification of the quantity of impurities contained in the construction materials before making the concrete for reinforced concrete structures in order to predict the mechanical performances of the concrete used in reinforced concrete structures.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Carneiro A.G., Prestes Y.O., Rollnic M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. *Ocean and Coastal Research*. 2020. Vol. 68. DOI: 10.1590/S2675-28242020068281
2. Fluvial sediment transport: Analytical techniques for measuring sediment load. *IAEA-TECDOC-1461*. 2005.
3. Brambilla D., Papini M., Longoni L. Temporal and spatial variability of sediment transport in a mountain river: A preliminary investigation of the Caldane River, Italy. *Geosciences*. 2018; 8(5):163. DOI: 10.3390/geosciences8050163
4. Abdel-Fattah S., Amin A., Van Rijn L.C. Sand transport in Nile River, Egypt. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004; 130(6):488-500. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:6(488)
5. Ngugi H.N., Mutuku R.N., Gariy Z.A. Effects of sand quality on compressive strength of concrete: A case of Nairobi County and Its Environs, Kenya. *Open Journal of Civil Engineering*. 2014. 4:255-273. DOI: 10.4236/ojce.2014.43022
6. Olanitori L.M. Mitigating the effect of clay content of sand on concrete strength. *31st conference on Our World in Concrete and Structures*. Singapore, 16-17 August 2006. 2006.
7. Gora J., Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00438. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00438
8. Hong L., Gu X., Lin F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 65:338-349. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131
9. Alawode O., Idowu O.I. Effects of water-cement ratios on the compressive strength and workability of concrete and lateritic concrete mixes. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 2011; 12(2):99-105.
10. Ojo O.M. Effect of water quality on compressive strength of concrete. *European Scientific Journal*. 2019; 15(12):172. DOI: 10.19044/esj.2019.v15n12p172
11. Obi Lawrence E. Empirical investigation of the effects of water quality on concrete compressive strength. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering*. 2016; 2(5):30-35. DOI: 10.20431/2454-8693.0205006
12. Dadhich P.N., Sharma R.K., Shekhawat S., Jain C., Gopal B. Impact of water quality on compressive strength of reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014; 3(03).
13. Wegian F.M. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. 2010; 3(4):235-243. DOI: 10.1080/19373260.2010.521048
14. Taylor M.A., Kuwairi A. Effects of ocean salts on the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1978; 8(4):492-500. DOI: 10.1016/0008-8846(78)90029-7
15. Olugbenga A.T.A. Effects of different sources of water on concrete stress: A case study of Ile-Ife. *Civil and Environmental Research*. 2014; 6:39-43.
16. Al-Jabri K.S., Al-Saidy A.H., Taha R., Al-Kemyani A.J. Effect of using Wastewater on the properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*. 2011; 14:370-376. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.046
17. Farid H., Mansoor M.S., Shah S.A.R., Khan N.M., Shabbir R.M.F., Adnan M. et al. Impact analysis of water quality on the development of construction materials. *Processes*. 2019; 7(9):579. DOI: 10.3390/pr7090579
18. Wasserman B. Wash water in the mix: effects on the compressive strength of concrete. *International Journal of Construction Education and Research*. 2012; 8(4):301-316. DOI: 10.1080/15578771.2011.633974
19. Ayodele F.O., Ayeni I.S. Analysis of influence of silt/clay impurities present in fine aggregates on the compressive strength of concrete. *International Journal of Engineering Research and Science and Technology*. 2015; 15(4):6.

Received August 28, 2021.

Adopted in revised form on October 22, 2021.

Approved for publication on October 22, 2021.

BIONOTES: **Emmanuel Mikerego** — Doctor (Ph.D.) in Engineering, Lecturer of the Faculty of Engineering Sciences; **University of Burundi**; B.P 2700, Bujumbura, Burundi; ORCID: 0000-0002-5743-6476; mikeregoemmanuel@hotmail.com;

Nestor Niyonzima — Doctor (Ph.D.) in Engineering, Lecturer of the Faculty of Engineering Sciences; **University of Burundi**; B.P 2700, Bujumbura, Burundi; Nestor.niyonzima@ub.edu.bi;

Jean Claude Ntirampeba — master student of Engineering Sciences; **University of Burundi**; B.P 2700, Bujumbura, Burundi; jntirampeba@gmail.com.

Contribution of the authors:

Mikerego E. — conceptualization, methodology, data processing, writing of the article, scientific editing of the text.

Niyonzima N. — conceptualization, writing of the article.

Ntirampeba J.C. — conceptualization, data gathering and processing.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 22 октября 2021 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Эммануэль Микерего** — доктор технических наук, преподаватель факультета инженерных наук; **Университет Бурунди**; В.Р 2700, г. Бужумбура, Бурунди; ORCID: 0000-0002-5743-6476; mikeregoemmanuel@hotmail.com;

Нестор Нийонзима — доктор технических наук, преподаватель факультета инженерных наук; **Университет Бурунди**; В.Р 2700, г. Бужумбура, Бурунди; Nestor.niyonzima@ub.edu.bi;

Жан Клод Нтирампеба — студент магистратуры технических наук; **Университет Бурунди**; В.Р 2700, г. Бужумбура, Бурунди; jntirampeba@gmail.com.

Вклад авторов:

Микерего Э. — концептуализация, методология, обработка данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Нийонзима Н. — концептуализация, написание статьи.

Нтирампеба Ж.К. — концептуализация, сбор и обработка данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Определение вероятности возникновения аварий на сетях газораспределения и газопотребления

Оксана Николаевна Медведева, Александр Юрьевич Чиликин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

(СГТУ имени Гагарина Ю.А.); г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе эксплуатации сети газораспределения и газопотребления подвергаются большому спектру нагрузок и воздействий, что в сочетании с продолжительным периодом эксплуатации приводит к снижению уровня надежности. Цель исследования — анализ текущего состояния газораспределительной системы РФ, основанный на статистическом материале по аварийности на сетях газораспределения и газопотребления. Наибольшую актуальность проблема обеспечения надежной работы и безопасной эксплуатации систем приобретает в крупных городах и поселениях с многоступенчатыми и разветвленными сетями газораспределения, поскольку с каждым годом увеличивается количество газопроводов, оборудования и арматуры, отработавших проектный ресурс. Задача заключается в выявлении причин и динамики аварийности, определяющих факторов, разработке алгоритма количественной оценки риска возникновения аварийных ситуаций и несчастных случаев на объектах газораспределительной системы.

Материалы и методы. Используются апробированные методы исследования, включающие анализ и обобщение теории и опыта в области надежности распределительных газопроводов, системный подход и математическое моделирование.

Результаты. Обобщены и систематизированы материалы по газификации территории Российской Федерации с помощью методов системного анализа. Рассмотрены механизмы развития отказов на сетях газораспределения и газопотребления, проанализированы данные об аварийности. Проведен обзор существующих методов устранения неисправностей и способов оценки состояния газопроводов, газовой арматуры и газоиспользующего оборудования. Предложены пути повышения эффективности, надежности и безопасности газораспределительных систем.

Выводы. Полученные в ходе анализа результаты по состоянию аварийности структурных элементов газораспределительной системы можно применять для мониторинга технического состояния системы, включая проведение предупредительных мероприятий для предотвращения аварийных инцидентов и получения комплексной оценки безопасности и надежности газоснабжения различных категорий потребителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газ, авария, чрезвычайная ситуация, промышленная безопасность, травматизм, опасный производственный объект, отказ, надежность, риск

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Медведева О.Н., Чиликин А.Ю. Определение вероятности возникновения аварий на сетях газораспределения и газопотребления // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1363–1377. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1363-1377

Автор, ответственный за переписку: Оксана Николаевна Медведева, medvedeva-on@mail.ru.

Determining the probability of accidents on gas distribution and gas consumption pipelines

Oksana N. Medvedeva, Aleksander Yu. Chilikin

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

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to analyze the current state of the Russian Federation gas distribution system, based on statistical material on accidents on gas distribution and gas consumption networks. The problem of ensuring reliable operation and safe operation of systems becomes most urgent in large cities and settlements with multi-stage and branched gas distribution networks, since every year the number of gas pipelines, equipment and fittings that have exhausted their design life increases. The objective of the study is to determine the causes and dynamics of accidents, identify the determining factors, develop an algorithm for quantitative assessment of the risk of emergencies and accidents at the facilities of the gas distribution system.

Materials and methods. In the work, proven research methods were used, including analysis and generalization of theory and experience in the field of reliability of gas distribution pipelines, a systematic approach and mathematical modeling were used.

Results. The materials on gasification of the territory of the Russian Federation using the methods of system analysis are generalized and systematized. Mechanisms of development of failures in gas distribution and gas consumption networks are considered, data on accidents are analyzed. The review of existing methods of troubleshooting and methods of assessing the state of gas pipelines, gas fittings and gas-using equipment is carried out. Methods for improving the efficiency, reliability and safety of gas distribution systems are proposed. The main results of the study are to summarize and systematize the materials of gas distribution organizations for the gasification of the territory of the Russian Federation using systems analysis methods.

Conclusions. The results obtained during the analysis on the state of the accident rate of the structural elements of the gas distribution system can be used to monitor the technical condition of the system, including taking preventive measures to prevent accident incidents.

KEYWORDS: gas, accident, emergency, industrial safety, injuries, hazardous production facility, failure, reliability, risk

FOR CITATION: Medvedeva O.N., Chilikin A.Yu. Determining the probability of accidents on gas distribution and gas consumption pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1363-1377. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1363-1377 (rus.).

Corresponding author: Oksana N. Medvedeva, medvedeva-on@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации сети газораспределения и газопотребления подвергаются большому спектру нагрузок и воздействий, что в сочетании с продолжительным периодом эксплуатации приводит к снижению уровня надежности. Несмотря на совершенствование оборудования и технологий, фактор безопасности газораспределительных систем остается первостепенным. Актуальной задачей является оценка аварийной опасности повреждений надземных и подземных газопроводов в зависимости от условий их прокладки, характера повреждений, давления газа, диаметров, атмосферных воздействий, а также оценка экологического влияния утечек газа из поврежденных газопроводов.

К числу приоритетных задач государственного управления, согласно Федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ, обязывающему предприятия предоставлять в органы надзора «Декларацию безопасности промышленного объекта», предопределяющую возможные риски возникновения аварийных ситуаций на объекте, входит, в том числе, и проблема промышленной безопасности объектов газораспределительных систем.

Замена и реконструкция морально и физически устаревших газопроводов и элементов газораспределительных систем — один из наиболее эффективных, и одновременно требующих значительных капитальных вложений способов повышения их надежности. Как правило, задача обеспечения надежной работы системы сводится к решению двух основных задач: своевременному обнаружению дефектов и прогнозированию условий их развития вплоть до момента разрушения [1].

Самый экономически выгодный способ доставки природного газа (ПГ) конечному потребителю — трубопроводный транспорт, занимающий важное место в топливно-энергетической безопасности страны. Однако данный вид перекачки углеводородов всегда сопровождается некоторыми потерями продукта при транспортировке. Эти потери, несомненно,

возможно отнести к категории неизбежных потерь, величину которых можно рассчитать и учесть. Вместе с тем существуют такие потери газа, которые рассчитать и спрогнозировать затруднительно. Это — потери, возникающие при аварийных ситуациях с неконтролируемым выбросом газа в окружающую среду и, в том числе, при несанкционированных врезках при хищении газа, приносящих большие убытки, связанные как с потерей газа и проведением на аварийном участке восстановительных работ, так и с экологическими последствиями при некачественном сооружении врезок. Поэтому на стадии проектирования или реконструкции возникает необходимость задуматься о безопасности трубопроводного транспорта газа, поскольку обеспечение надежной, безопасной и эффективной работы системы в экономическом и экологическом плане является главным требованием к объектам газовой инфраструктуры.

Одно из основных назначений газораспределительной системы — бесперебойная подача расчетного расхода газа потребителям, в связи с чем указанный параметр выступает ключевым показателем качественной работы сетей газораспределения и газопотребления [1, 2].

Отличительной чертой сетей газораспределения и газопотребления служит длительность их действия, но долговечность не характеризует надежность газораспределительной системы, она лишь оценивает надежность составляющих ее элементов. Помимо этого, особенность газораспределительных систем заключается в их социальном характере, ведь случающиеся аварии и инциденты, помимо экономического и имущественного, наносят еще и моральный ущерб потребителям, учесть последствия от которого не представляется возможным.

Из-за низкой аккумулирующей способности газопроводов низкого давления, являющейся причиной жесткой связи между количеством выдаваемого из сети газа и количеством потребляемого газа, повысить надежность такой сети за счет ее емкости нельзя. Из этого вытекает еще одно отличие газораспределительных сетей низкого давления — ограниченная возможность резервирования, в то время как послед-

нее относится к одному из способов повышения надежности. Вместе с тем следует указать на преимущество в данном аспекте систем высокого давления, аккумулирующая емкость которых более чем на 50 % превышает полезную емкость газопроводов среднего давления [2].

Интенсивное развитие газовой промышленности относится к числу приоритетных направлений. Одним из главных факторов, влияющих на безопасность эксплуатации систем газоснабжения, выступают выбросы и утечки из газопроводов, представляющие серьезную опасность взрывов и загораний с последующим травмированием и гибелью людей, и разрушением зданий. На сегодняшний день, несмотря на важность, вопросы оценки опасности утечек газа остаются недостаточно изученными.

Анализ литературных источников позволяет разделить их на два типа:

- посвященные мониторингу отказов, методам обнаружения и определения местоположения неисправностей¹ [3–5];
- рассматривающие методы оценки состояния и предупреждения отказов² [6–22].

В процессе отказа можно выделить два состояния объекта:

- частичный отказ — когда повреждение участка газопровода (арматуры, оборудования) незначительное и эксплуатация может быть продолжена;
- полный отказ — когда требуется замена аварийного участка (арматуры, оборудования).

В каждом конкретном случае продолжительность и механизм отказа зависит от состояния элемента газораспределительной системы и степени его износа.

Основные издержки эксплуатации газораспределительных систем связаны с повышенной аварийностью из-за дефектов при изготовлении или монтаже, различными повреждениями в процессе эксплуатации и при воздействии внешних факторов окружающей среды. Для оценки и контроля за состоянием системы с целью предотвращения отказов используется диагностическое обслуживание, позволяющее обнаружить множество не выявленных ранее дефектов различной природы. В качестве дефекта рассматривается любое отклонение или несоответствие рабочих параметров нормам регламентирующих документов.

В постановке и решении вопросов обеспечения и повышения безопасной и надежной работы систем газоснабжения с начала создания отрасли принимали участие многие авторитетные специалисты: Ю.М. Бе-

лудворский, П.М. Гофман-Захаров, А.А. Ионин, И.А. Коляда, И.С. Берсенев, Г.К. Кязимов, В.А. Багдасаров, С.В. Варфоломеев, Я.М. Торчинский и др.

Применительно к единой системе газоснабжения, как одной из больших энергетических систем, вопросы управления как в детерминированных условиях, так и в условиях риска и неопределенности с учетом вероятных внешних и внутренних возмущений разрабатывались Л.А. Мелентьевым, В.А. Смирновым, Е.И. Берхманом, А.М. Левиным, Д.Б. Баясановым, А.Ю. Ляуконисом и другими учеными.

Несмотря на неоспоримую практическую значимость этих работ, реализация методик на действующих объектах в некоторых случаях не позволяет устранить проблемные вопросы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стал анализ данных об аварийности при эксплуатации газопроводов, пунктов редуцирования, коммунально-бытовых объектов и внутридомового газоиспользующего оборудования по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)¹ (табл.).

Основные методические принципы и общие требования к расчету вероятности возникновения аварий и инцидентов на газовых сетях и анализу риска представлены в Приказе Ростехнадзора от 11.04.2016 № 144 «Об утверждении Руководства по безопасности “Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах”», и включают: анализ и организацию работ; распознавание опасностей; оценку риска, уточнение по объектам, входящим в газораспределительную систему (насколько те или иные линейные объекты и/или их участки опасны), разработку на основе этой информации различных рекомендаций по снижению рисков.

Как на частоту аварий, так и на общий срок эксплуатации газопровода оказывают влияние множество факторов, негативно сказывающихся на физическом состоянии газопроводов, в том числе отрицательные антропогенные и природные воздействия [1, 3, 5].

Актуальной задачей, помимо оценки аварийной опасности повреждений газопроводов в зависимости от характера прокладки, вида повреждений, давления перекачиваемого газа, диаметров газопроводов, является также оценка экологических воздействий утечек газа из поврежденных газопроводов [1, 5, 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве причин, приводящих к разрушению газопроводов и возникновению аварийных инцидентов

¹ Надзор за объектами нефтегазового комплекса // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/>

² EGIG. Gas Pipeline Incidents. European Gas Pipeline Incident Data Group : Groningen, The Netherlands. 2018.

Статистические данные по аварийности на сетях газораспределения и газопотребления
Statistical data on accidents on gas distribution and gas consumption networks

Год Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Механические повреждения газопроводов при производстве земляных работ Mechanical damage to gas pipelines during earthworks	30	36,1	34	50	42,9	28	68	53	34	40
Механические повреждения газопроводов автотранспортом Mechanical damage to gas pipelines by vehicles	16	11,1	12,8	15	0	3	0	9	13	20
Повреждения в результате природных явлений Damage due to natural phenomena	16	8,3	12,8	2,5	0	12	9	7	0	10
Коррозионные повреждения наружных газопроводов Corrosion damage to external gas pipelines	2	2,8	4,2	0	9,5	9	5	5	18	0
Разрывы сварных стыков Breaks of welded joints	2	2,8	4,2	7,5	0	3	0	0	4	0
Утечка газа в пунктах редуцирования Gas leaks at reduction points	6	0	8,6	10	9,5	21	0	9	0	5
Взрывы при розжиге, неисправность оборудования котла Explosions during ignition, boiler equipment malfunction	8	11,1	10,6	7,5	14,3	6	9	5	13	0
Неисправность оборудования сжиженных углеводородных газов (СУГ) LPG equipment malfunction	10	19,4	2,2	2,5	14,3	9	9	5	9	5
Иные Others	10	8,3	10,6	5	9,5	9	0	7	9	20
Травмы (количество человек) Injuries (number of people)	0	0	0	2	7	17	0	11	4	8
Смертельный исход (количество человек) Fatal outcome (number of people)	4	11	19	2	6	4	3	2	1	2

тов, можно выделить следующие: коррозионное разрушение подземных газопроводов вследствие повреждения изоляции и воздействия блуждающих токов; нарушение сроков обследования по определению опасного влияния блуждающих токов; нарушение сроков обследования по определению степени коррозионной агрессивности грунтов по трассе; нарушение требований правил промышленной безопасности по срокам устранения дефектов изоляционного покрытия, контролю степени одоризации газа, отключению аварийного газопровода от газораспределительной системы и принятии мер по эвакуации людей из опасной зоны при обнаружении объемной доли газа в подвалах; невыполнение требований Правил охраны газораспределительных сетей организациями, ведущими земляные работы в охранных зонах сетей газораспределения; несвоевременное диагностирование технических устройств с целью продления ресурса газопроводов, отслуживших нормативный срок службы; несоответствие нормативным

требованиям качества изоляционных материалов и устаревших технологий их нанесения и др. Самой актуальной проблемой остается физический износ газопроводов и оборудования, значительная часть которых эксплуатируются более 20–25 лет практически без капитального ремонта, кроме этого замена изношенных основных фондов осуществляется крайне медленными темпами.

Мониторинг состояния внутридомового (ВДГО) и внутриквартирного газового оборудования (ВКГО) также показывает значительный износ газоиспользующего оборудования и низкий показатель обслуживания, что влечет за собой опасность взрывов газовоздушной смеси в помещениях и другие негативные последствия. Осложняет ситуацию и тот факт, что в эксплуатации находится оборудование, изготовленное в разные годы различными заводами-изготовителями — отечественными и зарубежными, отличающееся технической документацией и эксплуатационными характеристиками.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 14.05.2013 № 410 «О мерах по обеспечению безопасности при использовании и содержании внутридомового и внутриквартирного газового оборудования» собственник внутридомового и/или внутриквартирного газоиспользующего оборудования несет полную ответственность за его содержание и безопасную эксплуатацию. Для оценки и дальнейшей безопасной эксплуатации газоиспользующего оборудования собственник должен заключить договор о техническом и аварийном обслуживании (ТО) и ремонте со специализированной организацией, работники которой помогут поддерживать внутридомовое (внутриквартирное) газоиспользующее оборудование в техническом состоянии, соответствующем предъявляемым к нему нормативным требованиям. Техническое обслуживание газоиспользующего оборудования, например газового котла, — обязательное мероприятие для его безопасной эксплуатации и позволяет избежать аварийных ситуаций с системой отопления в зимний период, а плановое обслуживание дает возможность предупредить возникновение неисправности на начальной стадии и снизить стоимость ремонта, поскольку устаревшее оборудование снижает надежность системы.

Анализ аварий, произошедших на сетях газораспределения и газопотребления за последнее десятилетие, показывает, что наиболее аварийными объектами являются жилые дома и газопроводы — 90–93 % от общего числа аварий, и на них приходится свыше 90 % от общего количества пострадавших¹. Поэтому для грамотной эксплуатации газоиспользующего оборудования, помимо проведения первичного инструктажа, возникла необходимость внесения изменения в существующие нормативные документы и обучения граждан, например, по выполнению работ по проверке состояния и прочистке дымовых и вентиляционных каналов в газифицированных жилых домах (Приказом Минстроя России № 1614/пр была утверждена «Инструкция по безопасному использованию газа при удовлетворении коммунально-бытовых нужд»).

Проблемными остаются вопросы по приведению автоматики безопасности газоиспользующего оборудования и телемеханики в соответствие с современными техническими требованиями.

Применение риск-ориентированного подхода в надзорной деятельности основано на разделении опасных производственных объектов на классы опасности (показатель опасности объекта). За 2019 год федеральный государственный надзор в области промышленной безопасности осуществлялся в отношении свыше 64 тысяч опасных производственных объектов (ОПО) сетей газораспределения и газопотребления, относящихся к четырем классам опасности.

На сегодняшний день газопроводы сетей газораспределения и газопотребления протяженностью

958 760 км снабжают газом 18 594 поднадзорных промышленных предприятий, 447 тепловых электрических станций, 58 655 газовых отопительных и производственных котельных. По сравнению с 2018 г. в 2019 г. на объектах газораспределения и газопотребления произошло снижение числа аварий на 3 % (см. табл.).

Согласно имеющимся данным, в 2016 г. в Саратовской области был зарегистрирован 71 инцидент, при этом 65 из них произошло в результате ненадлежащего использования внутридомового газового оборудования (утечки газа на газовых приборах ВДГО, внутриподъездных газопроводах и газопроводах-вводах в подъезды жилых домов, нарушение абонентами правил пользования газовыми приборами ВДГО, приведшее к отравлению угарным газом). За 2017 г. произошло 49 инцидентов, из них пожары и случаи, связанные с использованием внутридомового газоиспользующего оборудования, составляют 45 (рис. 1).

При анализе обращает на себя внимание значительный процент аварий от механических повреждений газопроводов сторонними организациями, что свидетельствует об отсутствии согласования с газораспределительной организацией и присутствия на месте работ ее представителя для должного контроля за производством земляных работ (что является прямым нарушением требований федеральных норм и «Правил безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»).

Следует отметить существенное, по сравнению с предыдущими годами, снижение инцидентов, связанных со стихийными явлениями (падение деревьев, упавший с крыши снег, ледяные глыбы, оползни, паводок); несанкционированным вмешательством в работу газоиспользующего оборудования посторонних лиц; террористическими действиями; нарушением работы пунктов редуцирования; образованием гидратных закупорок и обледенением оборудования.

Помимо перечисленных факторов, частые причины возникновения аварийных ситуаций — использование газоиспользующего оборудования и арматуры с истекшим сроком службы [3, 4]. Правительство РФ еще в 2013 г. приняло Правила пользования газом в части обеспечения безопасности при использовании и содержании внутридомового и внутриквартирного газового оборудования при предоставлении коммунальной услуги по газоснабжению (Постановление от 14.05.2013 № 410), обязывающие проводить техническое диагностирование газоиспользующего оборудования с истекшим сроком службы, которое, однако, не дает гарантии продления его применения. Кроме этого, старое оборудование подлежит ежегодному техническому обслуживанию, что повышает денежную нагрузку на потребителей, в связи с чем целесообразнее проводить своевременную замену

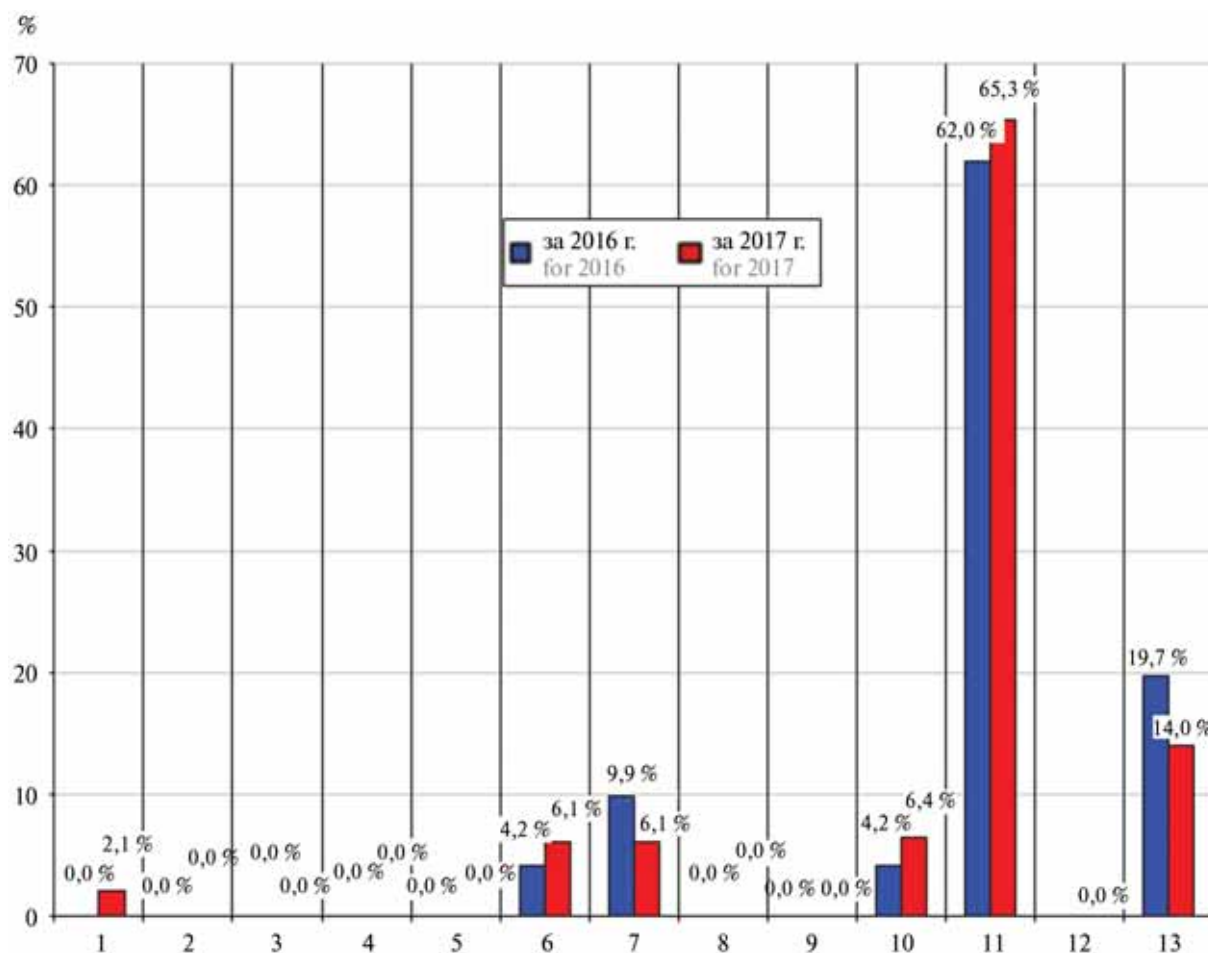


Рис. 1. Анализ инцидентов, произошедших за 2016–2017 гг. (по данным АО «Газпром газораспределение Саратовская область»): 1 — механические повреждения надземных газопроводов автотранспортом; 2 — коррозионные повреждения; 3 — стихийные явления (оползни, паводки, падения деревьев); 4 — отключение и повреждение газового оборудования и газопроводов неизвестными лицами и связанные с террористическими действиями; 5 — при понижении давления срабатывание ПЗК в ГРП; 6 — механические повреждения подземных газопроводов при земляных работах сторонними организациями; 7 — пожары (неосторожное обращение с огнем, перекал печи); 8 — утечка газа (во фланцевом соединении, разрыв св. шва, микротрещина); 9 — образование гидратных пробок, обледенение оборудования; 10 — ВДГО (ОДГО); 11 — отравление угарным газом; 12 — повреждение газопровода ветхими строениями; 13 — прочие (не связанные с использованием газа)

Fig. 1. Analysis of incidents that occurred in 2016–2017 (according to JSC Gazprom Gas Distribution Saratov Region): 1 — mechanical damage to overhead gas pipelines by vehicles; 2 — corrosion damage; 3 — natural phenomena (landslides, floods, falling trees); 4 — disconnection and damage of gas equipment and gas pipelines by unknown persons and associated with terrorist actions; 5 — when the pressure drops, the shut-off valve is triggered in the hydraulic fracturing; 6 — mechanical damage to underground gas pipelines during earthworks by third-party organizations; 7 — fires (careless handling of fire, overheated furnaces); 8 — gas leak (in the flange connection, rupture of the holy seam, microcrack); 9 — formation of hydrate plugs, equipment icing; 10 — VDGO (ODGO); 11 — carbon monoxide poisoning; 12 — damage to the gas pipeline by dilapidated buildings; 13 — other (not related to the use of gas)

газоиспользующего оборудования и арматуры с истекшим сроком службы.

В результате воздействия природных и техногенных факторов при повреждении газопроводов происходит массовый выброс ПГ в атмосферу, при этом образовавшаяся газовоздушная смесь — легко воспламеняемая, и большая часть разрывов газопроводов сопровождается ее интенсивным горением, нанося ощутимый экологический урон окружающей

среде и тяжелые экономические последствия (штрафы, компенсации за причиненный ущерб, затраты на восстановительные работы).

На рис. 2 представлена величина экономического ущерба от аварий на сетях газораспределения и газопотребления с 2011 по 2019 гг.

Согласно статистике, объем утечек по причине аварийного выброса газа из-за разрыва газопровода варьируется в диапазоне от 2,5 до 3 млн м³ [1].

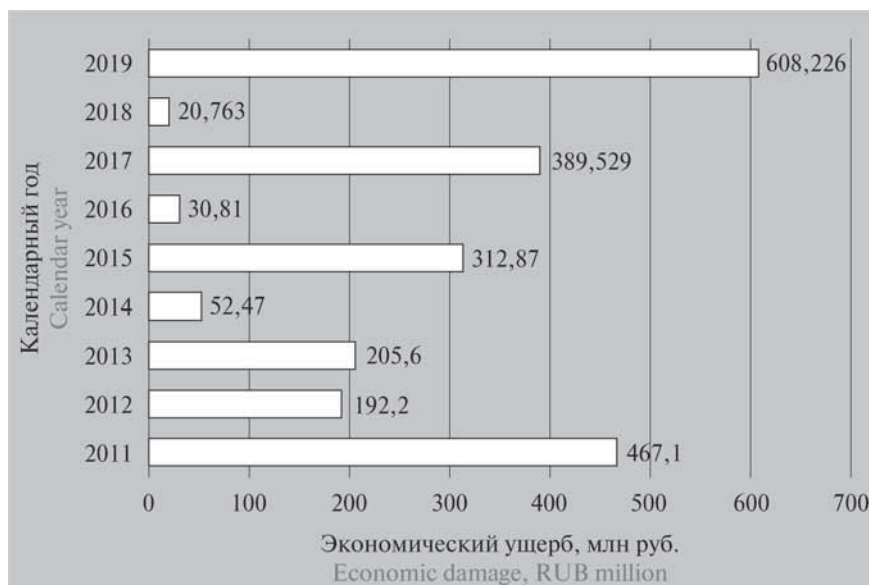


Рис. 2. Экономический ущерб от аварий на сетях газораспределения и газопотребления (данные Ростехнадзора)

Fig. 2. Economic damage from accidents on gas distribution and gas consumption networks (data from Rostekhnadzor)

Как показывает анализ, возможные объемы утечек для внутридомовых газопроводов в зависимости от размера повреждения могут составлять 0,1–1000 м³/ч, а для наружных газовых сетей — 1000–10 000 м³/ч. Однако утечки из внутридомовых газораспределительных систем представляют большую опасность, нежели выбросы газа из наружных распределительных газопроводов. Это обстоятельство объясняется сложностью создания условий для взрыва газовоздушной смеси в открытом пространстве без источника воспламенения, в то время как утечка внутри здания может образовать взрывоопасную концентрацию, приводящую к взрыву и разрушениям. Взрыв ПГ может произойти при случайном совпадении следующих событий: отказ в системе редуцирования, отказ срабатывания предохранительно-сбросного и предохранительно-запорного клапанов и случайное появление источника воспламенения газовоздушной смеси. Действенными мерами обеспечения безопасности являются надлежащая работа приточно-вытяжной вентиляции и оборудование систем внутридомового газоснабжения сигнализаторами загазованности, автоматически отключающими подачу газа при возникновении аварийных ситуаций.

При любых видах повреждений расчет утечки газа из надземного газопровода можно отнести к стандартному расчету истечения газа из трубопровода в атмосферу, которое определяется давлением газа в газопроводе, площадью отверстия повреждения и его конфигурацией.

Более сложный расчет утечки газа из подземного газопровода. Этот расчет устанавливается целым рядом определяющих факторов (кроме давления, площади и конфигурации отверстия): глубиной заложения газопроводов, физическими и температур-

ными характеристиками грунта, степенью его сопротивления движению газа и др.

До 2018 г. объем аварийных выбросов рассчитывался по методике, разработанной АО «Гипрони-газ», — упрощенный метод расчета возможного выброса газа в условиях повреждения подземных и надземных газопроводов, в котором сопротивлением грунта пренебрегается и считается, что весь газ выходит в атмосферу. Однако, как показал анализ, при проведении расчетов не учитываются изменение режима функционирования сети в случае наступления аварийной ситуации: снижение давления газа в газопроводе, нарушение режима потребления газа у различных категорий потребителей и другие факторы. Помимо этого, расчетные значения выбросов были значительно завышены по сравнению с действительными.

Согласно информации, представленной в работе [24], удельное количество выбросов газа, истекающего в атмосферу из щели в сварном шве стыка газопровода G , г/с, определяется по формуле:

$$G = 20\,500 \varphi \pi d l \delta \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0r}} \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P_1} \rho_{0r}}, \quad (1)$$

где φ — коэффициент, учитывающий снижение скорости из-за наличия сопротивления трения и потерь энергии за счет завихрения потока. Согласно публикации [24] при истечении из отверстия с острыми кромками принимается равным 0,97; при истечении из отверстия, имеющего примерную форму цилиндра, — 0,82; при истечении из расширяющегося отверстия — 0,95–0,98; f — площадь отверстия, м²; l — длина линий разрыва наружного периметра трубы, % от общего периметра; d — диаметр газопро-

вода, м; δ — ширина раскрытия щели (отверстия аварийного повреждения), м; ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; T_1 — абсолютная температура окружающей среды, К; T_0 — абсолютная температура газа в газопроводе, К; P_0 — абсолютное давление газа в газопроводе в месте расположения сварного стыка, Па; P_1 — атмосферное давление, Па ($P_1 = 101325$ Па).

При расчете скорости истечения (выброса) газа следует учитывать давление газа перед аварийным отверстием. При низком давлении газа (до 5 кПа), м/с:

$$W_r = 1,4142 \sqrt{\frac{P_0 - P_1}{\rho_r}}. \quad (2)$$

При среднем давлении газа (от 5 кПа до 0,09 МПа) необходимо учитывать наступление критических условий истечения, м/с:

$$W_r = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_0 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

где k — показатель адиабаты (определяется согласно ГСССД 160-93 «Таблицы стандартных справочных данных. Газ природный расчетный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука, показатель адиабаты и коэффициент объемного расширения при температурах 250...450 К и давлениях 0,1...12 МПа»).

Используя закон сохранения массы, можно определить объем выбросов газа через поврежденную часть газопровода [1, 25]. Так, для газопроводов низкого и среднего (высокого) давления объем утечек, в зависимости от размера повреждения, можно вычислить путем совместного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} P_x = P_1 - 54,5 \left(\frac{0,01}{d} + 2,9 \cdot 10^{-2} \frac{d}{Q_x} \right)^{0,25} \frac{Q_x^2}{d^5} l_x, \\ V_x = 3,7 f_x P_x^{0,5} = 2,9 d^2 \phi P_x^{0,5} c_2; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{x,c(b)}^2 = P_1^2 - 1,11 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \left(\frac{0,01}{d} + 2,9 \cdot 10^{-2} \frac{d}{Q_x} \right)^{0,25} \frac{Q_x^2}{d^5} l_x, \\ V_{x,c(b)} = 1090 f_x P_x, \end{cases} \quad (5)$$

где P_x — избыточное давление перед отверстием повреждения газопровода, МПа; P_1 — абсолютное давление газа в начале газопровода, МПа; d — внутренний диаметр газопровода, мм; Q_x — объем выброса газа, поступающего к месту повреждения газопровода; l_x — расчетная длина газопровода постоянного диаметра, м; V_x — объем выброса (утечки) газа в атмосферу, м³; f_x — площадь отверстия повреждения

газопровода, см²; c_2 — размер повреждения (может быть определен как доля полного открытого поперечного сечения газопровода).

Результаты расчетов показывают, что утечка газа из газопроводов среднего давления почти в три раза превышает утечки из газопроводов низкого давления [1]. Однако экспериментальными исследованиями доказано, что продолжительность аварии на газопроводах меньшего диаметра существенно сокращается, и эксплуатация таких систем более экономична и надежна. Вместе с тем, должны быть сохранены и неукоснительно исполняться высокие требования к качеству монтажа и испытаниям газопроводов различных давлений.

В процессе эксплуатации газораспределительной системы аварийная опасность оценивается объемом возможного аварийного выброса или утечки газа в зависимости от следующих определяющих факторов: диаметр и эксплуатационная протяженность газопровода, категория давления, геометрический размер и форма аварийного отверстия в газопроводе и других условий [1, 5].

При повреждении газопровода высокого (среднего) давления объем выброса газа, м³/ч, можно рассчитать по формуле:

$$V_{yg} = \rho_r \pi g \vartheta d^2 \phi P_{ав} C, \quad (6)$$

где ρ_r — плотность газа, кг/м³; g — ускорение силы тяжести; ϑ — коэффициент расхода газа через отверстие неправильной формы с необработанными краями; d — диаметр отверстия повреждения газопровода, см; ϕ — числовой коэффициент, определяемый по известным зависимостям при истечении газа в атмосферу и при избыточном давлении перед отверстием до 0,08 МПа; $P_{ав}$ — абсолютное давление газа внутри газопровода перед отверстием повреждения, МПа; C — числовой коэффициент, характеризующий размер повреждения газопровода, принимается как доля площади поперечного сечения трубы.

На сегодняшний день действуют рекомендации АО «Газпром газораспределение» (Р Газпром газораспределение 12.2.2-2-2015). В данном документе приводятся характеристики вариантов развития аварии:

- сохранение нормального режима газоснабжения — в период от начального момента аварии до начала проведения работ по локализации поврежденного участка сети газораспределения и (или) газопотребления в аварийно-диспетчерскую службу газораспределительной организации не поступали сведения о нарушении режимов поставки газа потребителям;
- нарушение нормального режима газоснабжения — если хотя бы по одному потребителю газа в период от начального момента аварии до начала проведения работ по локализации поврежденного участка сети газораспределения и (или) газопотребления в аварийно-диспетчерскую службу газорас-

пределительной организации поступали сведения о нарушении режимов поставки газа.

Объем аварийного выброса из участка газопровода устанавливается суммой выбросов газа до и после осуществления работ по локализации аварии, объема газа на продувку сети и объема газа, затрачиваемого на поставарийную регулировку и настройку оборудования.

Если рассматривать аварийный выброс газа как процесс истечения через дроссельное отверстие в атмосферу воздуха, можно прийти к следующему выводу, что применение теоретических методов для определения входящих в расчетные формулы коэффициентов расхода и коэффициентов, учитывающих изменение удельного объема сжимаемой среды при ее протекании через дроссельные отверстия, достаточно затруднительно.

Для определения больших и средних выбросов газа можно использовать процесс нерегулируемого дросселирования газа через седло регулятора давления, пропускная способность которого рассчитывается по известной формуле, м³/с:

$$V = \alpha \varepsilon f \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}}, \quad (7)$$

где V — пропускная способность или объемный расход среды в рабочем состоянии, м³/с; α — коэффициент расхода, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока, обусловленную влиянием вязкости среды и трения ее о трубопровод и сужающее устройство (проход). Величина коэффициента α зависит главным образом от типа и конструкции сужающего устройства, числа Рейнольдса и отношения площадей сужающего устройства и трубопровода, и почти не зависит от рода протекающей среды; ε — коэффициент, учитывающий изменение удельного веса газа при протекании через дроссельное устройство, зависит от отношения величины перепада давления ΔP в дроссельном органе к абсолютному давлению газа или пара до дроссельного органа P_1 . Для различных газов при одних и тех же величинах указанного отношения коэффициент ε зависит от показателя адиабаты k . Кроме того, ε зависит от отношения площадей сужающего устройства и трубопровода (m) и типа сужающего устройства:

$$\varepsilon = f\left(\frac{\Delta P}{P_1}; k; m\right), \quad (8)$$

где f — площадь свободного проходного сечения дроссельного органа, м²; g — ускорение силы тяжести, м/с²; γ — удельный вес газа в рабочем состоянии перед дроссельным органом, кг/м³: $\gamma = \rho_1 g$; ρ_1 — плотность газа, кг/м³; ΔP — перепад давления в дроссельном органе, МПа; $\Delta P = P_1 - P_2$; P_1 — абсолютное давление среды перед дроссельным органом, МПа;

P_2 — абсолютное давление среды после дроссельного органа, МПа.

После преобразований расход истекаемого газа, м³/ч, определится по формуле:

$$V = 0,0125 \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}}, \quad (9)$$

где d — диаметр аварийного отверстия, мм.

При рабочем состоянии среды (при давлении P и температуре T) расход газа из отверстия повреждения, м³/ч, составит:

$$V = 0,0125 \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{P_1 T_H \Delta P}{P_H T K \gamma_H}}, \quad (10)$$

где K — коэффициент сжимаемости газа:

$$K = \frac{z}{z_c}, \quad (11)$$

где z — фактор сжимаемости ПГ при рабочих условиях; z_c — фактор сжимаемости ПГ при стандартных условиях; T_H — абсолютная температура газа, соответствующая нормальным условиям (0 °С, 273,16 К); T — температура газа, соответствующая рабочим условиям, К; P_H — абсолютное давление газа, соответствующее нормальным условиям, (0 °С и 760 мм рт. ст.), $P_H = 101,325$ кПа. Стандартные условия указаны в ГОСТ 2939 и составляют $P_c = 101,325$ кПа; $T_c = 293,15$ К.

Коэффициент сжимаемости, коэффициент адиабаты и плотность газа при измеренных значениях температуры и давления рассчитываются по методике, изложенной в ГОСТ 30319.2-2015.

Для приближенного определения пропускной способности регуляторов давления широко используются формулами адиабатического истечения газов и паров из сужающихся сопел или сопел, имеющих постоянное сечение. Тогда при нормальных условиях, м³/с:

$$V = \alpha f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \frac{\sqrt{P_1 \gamma}}{\gamma_H}}. \quad (12)$$

Приведенные расчетные формулы для расчета расхода газа даны для условия, когда $\frac{P_2}{P_1} > \beta_{кр}$, где β — коэффициент, по которому судят о режиме истечения:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (13)$$

При $\beta < \beta_{кр}$ режим истечения — сверхзвуковой, при $\beta > \beta_{кр}$ — дозвуковой; $\beta = \beta_{кр}$ — скорость истечения равна местной скорости звука:

$$a = 18,591 \left(\frac{T k z}{z_c \rho_c} \right)^{0,5}, \quad (14)$$

где ρ_c — плотность при стандартных условиях.

Для условия, когда $\frac{P_2}{P_1} \leq \beta_{кр}$, расход газа составит:

$$V = \alpha f \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{\sqrt{P_1 \gamma}}{\gamma_H}}. \quad (15)$$

При критической скорости истечения с учетом уравнения неразрывности и закона сохранения массы при малых утечках газа, когда они практически не влияют на сложившийся до их появления гидравлический режим газопровода (когда пьезометрический график можно принять неизменным) и при средних по величине повреждениях в конце газопровода для определения расхода истечения предлагается следующая формула, м³/с:

$$V = 18,591 \left(\frac{T k z}{z_c \rho_c} \right)^{0,5} 3600 f \alpha \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma_H}}. \quad (16)$$

Анализ большого количества аварий на системах газоснабжения показывает, что процесс возникновения аварий имеет случайный характер. Вероятность аварии на газопроводе при одинаковых условиях монтажа и эксплуатации можно считать одинаковой, хотя в реальных условиях какой-то участок системы газоснабжения будет находиться в более благоприятных условиях. Например, если сравнивать серьезность последствий аварии, произошедшей вблизи источника питания, и на периферийных участках. Одним из важных вопросов, требующих решения при проектировании систем газоснабжения, является вопрос о целесообразном количестве и местах установки отключающих устройств, при решении которого следует руководствоваться соображениями надежности и экономичности. Очевидно, необоснованно большое количество отключающей арматуры удорожает систему и усложняет эксплуатацию. Однако протяженность отключаемого в случае аварии участка оказывает существенное влияние на бесперебойность газоснабжения. Например, в кольцевых сетях среднего давления каждый участок имеет возможность газоснабжения с двух сторон, и в случае аварии прекратится газоснабжение потребителей, расположенных только на отключаемом аварийном участке, или потребители смогут получить газ обходным путем при условии резерва пропускной способности соседних исправных участков сети. Поэтому для повышения надежности такой сети отключающие устройства следует устанавливать из условия обеспечения газовым топливом в случае аварии как можно большего количества потребителей и предусматривать резерв пропускной способности, по-

зволяющий минимизировать недоотпуск газового топлива при инцидентах и авариях.

Опыт диагностики газовых сетей свидетельствует, что среди всех обнаруживаемых дефектов значительную часть составляют монтажные дефекты, вызванные нарушением технологии прокладки газопроводов и монтажа газовой арматуры (рис. 3), и разрушительные коррозионные процессы (рис. 4).



Рис. 3. Дефекты монтажных и сварочных работ на пункте редуцирования (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Defects in installation and welding works at the reduction point (illustrations by the authors)



Рис. 4. Газопровод, поврежденный коррозией (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Corroded gas pipeline (illustration by the authors)

При этом активный процесс коррозии протекает, как правило, в верхней части газопровода, поскольку температура по площади трубы в течение года распределяется неравномерно. Также к числу определяющих факторов возникновения коррозии следует отнести нагрузку от слоя грунта (глубину заложения

газопровода). Как показала обработка статистического материала, наибольшее количество повреждений происходит на газопроводах, бывших в эксплуатации свыше 35 лет. За период с 2008 по 2018 гг. на газораспределительных сетях было зафиксировано свыше 1700 аварийных инцидентов с суммарным ущербом от 7 млн руб./год.

Анализ имеющихся статистических данных показал, что из общего количества аварий, связанных с распределением и использованием ПГ, на аварии на газопроводах приходится до 50 %. Аварии, связанные с распределением и использованием газа, — порядка 30 %, при этом последствия от данной категории аварий более тяжелые и связаны с существенными материальными затратами. Таким образом, накопление и систематизация информации по характеру возникновения аварийных ситуаций, размерам ущерба у конкретных потребителей позволяют выявить наиболее уязвимые места и разработать организационные мероприятия по их предупреждению и ликвидации, в том числе путем проведения разного рода исследований и проектных разработок, направленных на повышение уровня безопасности газораспределительных систем, минимизацию материального ущерба и человеческих жертв. Расчет оптимального уровня надежности, как одной из технико-экономических категорий, включая анализ и оценку риска, должен быть одним из необходимых этапов разработки проектов газораспределительных систем и их дальнейшей эксплуатации.

Также важным фактором надежной эксплуатации объектов и оборудования газораспределительной системы служит точность установления остаточного срока службы или остаточного ресурса. Для оценки остаточного ресурса используются различные методы и средства диагностики. Вместе с тем большая часть существующих методов основана на детерминированных моделях износа оборудования и сложной в применении теории случайных процессов. Анализ литературных источников, посвященных данному вопросу [26–28], показал, что наиболее приемлема методология, основанная на представлении о том, что остаточный срок службы (ресурс) машины является случайной величиной, которую можно описать только вероятностными моделями [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение современных методов мониторинга и диагностики, своевременный капитальный ремонт и реконструкция позволяют в том числе продлить срок службы объектов газораспределительных систем.

Проведенные исследования и анализ дают возможность сделать следующие основные выводы:

- газораспределительная система порождает поток аварий и инцидентов, интенсивность которых зависит от расхода газового топлива, протяженности

газопроводов, срока эксплуатации объектов газового хозяйства, конфигурации системы, категории давления газа и других определяющих факторов;

- аварийные ситуация на сетях газораспределения и газопотребления оказывают существенное влияние на экономическое развитие топливно-энергетического комплекса;

- возникновение и развитие аварийных ситуаций в большинстве своем носит случайный характер;

- наиболее опасным объектом газораспределительных систем являются внутридомовые системы и газоиспользующее оборудование;

- регулярный характер носит возникновение аварийных ситуаций из-за нарушения требований нормативной документации и несоблюдение технологии строительно-монтажных работ сторонними организациями;

- аварии, вызванные наличием внутренних скрытых дефектов газоиспользующего оборудования, арматуры и трубопроводов, характеризуются тяжелыми последствиями и носят неконтролируемый характер.

Энергетическая безопасность — один из главных стратегических ориентиров. Действенными методами обеспечения безопасности функционирования газораспределительной системы служат усиление контроля к порядку выдачи согласований и разрешений на вскрышные работы, своевременное проведение работ по выявлению утечек приборным методом и проведением внеочередного приборного обследования газопроводов. Кроме этого, для обеспечения надежной эксплуатации и поддержания проектных характеристик газопроводов и оборудования необходима их ежегодная плановая замена.

Эффективность функционирования при этом напрямую зависит от качества оценки рисков и методов устранения дефектов. Для этого применяются уникальные технологии диагностики трубопроводных систем с использованием электрометрии, внутритрубно́й диагностики, акустической эмиссии, аэрокосмических методов, ГИС-технологий, ультразвукового и рентгеновского контроля, мощного технического и экологического мониторинга.

Обеспечение безопасной эксплуатации объектов газотранспортной системы и безопасного использования газа различными категориями потребителей зависят не только от четкой организации системы надзора, методологии учета и анализа аварийности систем, разработки методологических принципов по повышению эффективности и надежности газораспределительных систем, установления связи между показателями надежности и конструктивными особенностями, но и от осуществления конкретных решений на уровне совершенствования отдельных элементов и оборудования, включая создание новых конструкций и технологий с критической оценкой на предмет экономической обоснованности применяемых решений, а также уход от традиционной ме-

тодологии проектирования газораспределительных систем на максимум газопотребления, избыточного резервирования и повышенной материалоемкости.

Для оценки взаимного влияния дисконтированных затрат и выбросов газа проведены сравнительные расчеты по принятым в настоящее время категориям давлений газа. Как показывают результаты расчетов, повышение давления газа в газопроводах позволяет снизить материальные затраты и уменьшает потенциальную аварийную опасность.

Дополнительного снижения металло-, материалоемкости газовых сетей (до 10–15 % при снижении их стоимости до 4–5 %) можно достичь оптимальным распределением расчетного перепада давления между участками сети в зависимости от характера планировки и застройки населенного пункта. Эксплуатационная и проектная практика научно-исследовательского и проектного института АО «Гипрогаз» и исследования, проведенные Л.М. Фастовым, доказывают, что при работе сети газораспределения не всегда удастся полностью использовать расчетный перепад давления, величина которого регламентирована нормативными документами в размере 1800 Па ($\Delta P = 1$). Это обстоятельство также было учтено при сравнительных расчетах — расчеты проводились для следующих значений ΔP : $\Delta P = 1$; $\Delta P = 0,75 \Delta P$; $\Delta P = 0,5 \Delta P$; $\Delta P = 0,25 \Delta P$. Анализ полученных результатов показал, что неполное использование располагаемого расчетного перепада давления заметно увеличивает дисконтированные затраты в устройство системы, одновременно повышая опасность утечек газа. Так, например, при использовании расчетного перепада давления на 75 % ($0,75 \Delta P$) для высокого (среднего) давления газа в газопроводе затраты возрастают почти на 5–10 %, а опасность утечки газа увеличивается на 10–20 %.

Выявление утечек газа при нарушении герметичности газопроводов в процессе эксплуатации или возникновении аварийных ситуаций — сложная задача. Помимо усовершенствования приборных методов обнаружения утечек и проверки герметичности

запорно-регулирующей арматуры, улучшения системы одоризации и учета расхода газа, важную роль играют количественные методы определения утечек, позволяющие установить наличие и величину аварийного выброса газа, в том числе на труднодоступных участках сети газораспределения, и выявить степень срочности устранения аварийной ситуации. Кроме этого, применение одноступенчатых сетей газораспределения — подача газа потребителям осуществляется по газопроводам высокого (среднего) давления, а снижение давления газа перед подачей в здание производится в пунктах редуцирования, оборудованных домовыми регуляторами давления, — является важным резервом повышения экономической эффективности газораспределительных систем. Целесообразность и эффективность применения одноступенчатых газораспределительных систем в качестве альтернативы двухступенчатым системам доказана многолетним зарубежным опытом эксплуатации и результатами их апробации в отечественной практике.

Использование системного подхода и причинно-следственных связей при учете и анализе аварийности в газовом хозяйстве дают возможность научно обосновать методы безопасной эксплуатации, диагностики и контроля состояния объектов газового комплекса, разработать подходы к решению ряда важных задач: повышение безопасности систем на стадии проектирования и эксплуатации; оценка опасности утечек газа; определение объемов выбросов газа; выявление технических рисков функционирования системы газораспределения, определяющихся вероятностью, и градация по последствиям определенного уровня; оценка риска аварии на основании результатов приборного технического обследования распределительных газопроводов; установление срока продления эксплуатации системы в состоянии, отвечающем заданным показателям технической надежности и безопасности, на основании экономических показателей затрат на дальнейшую эксплуатацию и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фастов Л.М., Медведева О.Н., Соловьева Е.Б. Надежность систем газоснабжения: монография. Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2012. 148 с.
2. Медведева О.Н., Иванов А.И. Развитие распределительных систем газоснабжения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. Т. 3. № 1 (76). С. 75–79.
3. Ильин В.И., Кузовлева Я.И., Плотникова М.И. Анализ аварийности на объектах газораспределительных организаций // Газовая промышленность. 2016. № 3 (742). С. 82–83.
4. Белоусенко И.В., Ковалев А.П., Лехтман И.И. Влияние надежности оборудования газораспределительных пунктов на взрывобезопасность газифицированных объектов // Промышленная энергетика. 2011. № 11. С. 48–54.
5. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Аварийные выбросы природного газа: проблемы и пути их решения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 8. С. 4–11.
6. Бодэ И. Опыт ремонта газовых вводов в газораспределительных организациях Латвии // Науч-

но-технические проблемы совершенствования и развития систем газотеплоснабжения. 2018. № 1. С. 7–13.

7. Sun B., Utikar R.P., Pareek V.K., Guo K. Computational fluid dynamics analysis of liquefied natural gas dispersion for risk assessment strategies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Issue 1. Pp. 117–128. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.10.002

8. Weller Z.D., Yang D.K., Fischer J.C. An open source algorithm to detect natural gas leaks from mobile methane survey data // PLoS ONE. 2019. Vol. 14. Issue 2. P. e0212287. DOI: 10.1371/journal.pone.0212287

9. Zimmerle D.J., Williams L.L., Vaughn T.L., Quinn C., Subramanian R., Duggan G.P. et al. Methane Emissions from the Natural Gas Transmission and Storage System in the United States // Environmental Science and Technology. 2015. Vol. 49. Issue 15. DOI: 10.1021/acs.est.5b01669

10. Hendrick M.F., Ackley R., Sanaie-Movahed B., Tang X., Phillips N.G. Fugitive methane emissions from leak-prone natural gas distribution infrastructure in urban environments // Environmental Pollution. 2016. Vol. 213. Issue 44. Pp. 710–716. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.01.094

11. Wang W., Shen K., Wang B., Dong C., Khan F., Wang Q. Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.040

12. Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования. Deutschland, Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 141 p.

13. Bakesheva A.T., Irgibaev T.I., Belousov A.E. Determination of natural gas loss values based on physical simulation of leakages from the pipeline to the media with superatmospheric pressure using a volumetric-type expander // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2019. Vol. 3. Issue 435. Pp. 114–121. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.76

14. Bakesheva A.T., Fetisov V.G., Pshenin V.V. A refined algorithm for leak location in gas pipelines with determination of quantitative parameters // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12. Issue 12. Pp. 2867–2869.

15. Quy T.B., Kim J.-M. Real-Time Leak Detection for a Gas Pipeline Using a k-NN Classifier and Hybrid AE Features // Sensors. 2021. Vol. 21. Issue 2. Pp. 367. DOI: 10.3390/s21020367

16. Li Z., Zhang H., Tan D., Chen X., Lei H. A novel acoustic emission detection module for leakage recognition in a gas pipeline valve // Process Safety and

Environmental Protection. 2017. Vol. 105. Pp. 32–40. DOI: 10.1016/j.psep.2016.10.005

17. Li Sh., Wen Yu., Li P., Yang Jin, Dong X., Mu Ya. Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations // Journal of Sound and Vibration. 2014. Vol. 333. Issue 17. Pp. 3889–3903. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.018

18. Lu H., Iseley T., Behbahani S., Fu L. Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 96. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103249

19. Adnan N.F., Ghazali M.F., Amin M.M., Hamat A.M.A. Leak detection in gas pipeline by acoustic and signal processing — a review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 100. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/100/1/012013

20. Shan X., Liu K., Sun P.-L. Risk Analysis on Leakage Failure of Natural Gas Pipelines by Fuzzy Bayesian Network with a Bow-Tie Model // Scientific Programming. 2017. P. 3639524. DOI: 10.1155/2017/3639524

21. Zadkarami M., Shahbazian M., Salahshoor K. Pipeline leak diagnosis based on wavelet and statistical features using Dempster-Shafer classifier fusion technique // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 105. Pp. 156–163. DOI: 10.1016/j.psep.2016.11.002

22. Weller Z.D., Hamburg S.P., von Fischer J.C. A national estimate of methane leakage from pipeline mains in natural gas local distribution systems // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54. Issue 14. Pp. 8958–8967. DOI: 10.1021/acs.est.0c00437

23. Сальников С.Ю., Снежин А.Н., Протокишин В.М., Вaskanь И.Я. Моделирование нештатных и аварийных ситуаций в современных тренажерах // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2017. № 1 (29). С. 41–48.

24. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. Л. : Недра, 1966. 327 с.

25. Фастов Л.М. Новая формула для практических расчетов газопроводов // Газовая промышленность. 1992. № 8. С. 37.

26. Лейфер Л.А. Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение. М. : Знание, 1988. 60 с.

27. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М. : Высшая школа, 1988. 237 с.

28. Маннапов Р.Г. Методы оценки надежности оборудования, подвергающегося коррозии. М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. 47 с.

Поступила в редакцию 24 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Оксана Николаевна Медведева** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; **Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**; 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77; РИНЦ ID: 622756, Scopus: 56754888500, ResearcherID: S-8351-2016, ORCID: 0000-0002-0861-0335; medvedeva-on@mail.ru;

Александр Юрьевич Чиликин — аспирант кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; **Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**; 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77; Scopus: 57205433319; chilikin.063@gmail.com.

Вклад авторов:

Медведева О.Н. — научное руководство; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Чиликин А.Ю. — автор внес существенный вклад в концепцию исследования, получение данных, их анализ и интерпретацию.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fastov L.M., Medvedeva O.N. *Reliability of gas supply systems*. Saratov, Yuri Gagarin Saratov State Technical University, 2012; 148. (rus.).
2. Medvedeva O.N., Ivanov A.I. Development of gas distribution systems. *Bulletin of Saratov State Technical University*. 2014; 3(1):(76):75-79. (rus.).
3. Ilyin V.I., Kuzovlev Ya.I., Plotnikova M.I. Analysis of accidents at gas distribution organizations' sites. *Gas Industry*. 2016; 3(742):82-83. (rus.).
4. Belousenko I.V., Kovalev A.P., Lekhtman I.I. Influence of the reliability of gas distribution points equipment on the explosion safety of gasified objects. *Industrial Energy*. 2011; 11:48-54. (rus.).
5. Bashkin V.N., Galiulio R.V., Galiulina R.A. Emergency emissions of natural gas: problems and ways of their solution. *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*. 2010; 8:4-11. (rus.).
6. Bode I. Experience of repair of gas inlets in the gas distribution organizations of Latvia. *Scientific and Technical Problems of the Improvement and Development of Gas Supply Systems*. 2018; 1:7-13. (rus.).
7. Sun B., Utikar R.P., Pareek V.K., Guo K. Computational fluid dynamics analysis of liquefied natural gas dispersion for risk assessment strategies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(1):117-128. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.10.002
8. Weller Z.D., Yang D.K., Fischer J.C. An open source algorithm to detect natural gas leaks from mobile methane survey data. *PLoS ONE*. 2019; 14(2):e0212287. DOI: 10.1371/journal.pone.0212287
9. Zimmerle D.J., Williams L.L., Vaughn T.L., Quinn C., Subramanian R., Duggan G.P. et al. Methane Emissions from the Natural Gas Transmission and Storage System in the United States. *Environmental Science and Technology*. 2015; 49(15). DOI: 10.1021/acs.est.5b01669
10. Hendrick M.F., Ackley R., Sanaie-Movahed B., Tang X., Phillips N.G. Fugitive methane emissions from leak-prone natural gas distribution infrastructure in urban environments. *Environmental Pollution*. 2016; 213(44):710-716. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.01.094
11. Wang W., Shen K., Wang B., Dong C., Khan F., Wang Q. Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 111. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.040
12. Ravin A.A., Khrutskii O.V. *Forecasting technical condition of equipment*. Deutschland, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014; 141. (rus.).
13. Bakesheva A.T., Irgibaev T.I., Belousov A.E. Determination of natural gas loss values based on physical simulation of leakages from the pipeline to the media with superatmospheric pressure using a volumetric-type expander. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2019; 3(435):114-121. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.76
14. Bakesheva A.T., Fetisov V.G., Pshenin V.V. A refined algorithm for leak location in gas pipelines with determination of quantitative parameters. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2019; 12(12):2867-2869.
15. Quy T.B., Kim J.-M. Real-Time Leak Detection for a Gas Pipeline Using a k-NN Classifier and Hybrid AE Features. *Sensors*. 2021; 21(2):367. DOI: 10.3390/s21020367
16. Li Z., Zhang H., Tan D., Chen X., Lei H. A novel acoustic emission detection module for leakage recognition in a gas pipeline valve. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 105:32-40. DOI: 10.1016/j.psep.2016.10.005
17. Li Sh., Wen Yu., Li P., Yang Jin, Dong X., Mu Ya. Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations. *Journal of Sound and Vibration*. 2014; 333(17):3889-3903. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.018
18. Lu H., Iseley T., Behbahani S., Fu L. Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-

the-art. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 96. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103249

19. Adnan N.F., Ghazali M.F., Amin M.M., Hamat A.M.A. Leak detection in gas pipeline by acoustic and signal processing — a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015; 100:012013. DOI: 10.1088/1757-899X/100/1/012013

20. Shan X., Liu K., Sun P.-L. Risk Analysis on Leakage Failure of Natural Gas Pipelines by Fuzzy Bayesian Network with a Bow-Tie Model. *Scientific Programming*. 2017; 3639524. DOI: 10.1155/2017/3639524

21. Zadkarami M., Shahbazian M., Salahshoor K. Pipeline leak diagnosis based on wavelet and statistical features using Dempster-Shafer classifier fusion technique. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 105:156-163. DOI: 10.1016/j.psep.2016.11.002

22. Weller Z.D., Hamburg S.P., von Fischer J.C. A National Estimate of Methane Leakage from Pipeline Mains in Natural Gas Local Distribution Systems. *En-*

vironmental Science & Technology. 2020; 54(14):8958-8967. DOI: 10.1021/acs.est.0c00437

23. Salnikov S.Yu., Snezhin A.N., Prostokishin V.M., Vaskan I.Ya. Modelling off-nominal and emergency conditions in state-of-art training simulators. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2017; 1(29):41-48. (rus.).

24. Miheev V.P. *Gas fuel and its combustion*. Leningrad, Nedra, 1966; 329. (rus.).

25. Fastov L.M. A new formula for practical calculations of gas pipelines. *Gas Industry*. 1992; 8:37. (rus.).

26. Lejfer L.A. *Methods for predicting the residual life of machines and their software*. Moscow, Znanie, 1988; 60. (rus.).

27. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. *Machine reliability*. Moscow, Vysshaya shkola, 1988; 238. (rus.).

28. Mannapov R.G. *Methods for assessing the reliability of equipment subject to corrosion*. Moscow, CINTIhimneftemash, 1990; 48. (rus.).

Received June 24, 2021.

Adopted in revised form on September 27, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

B I O N O T E S: **Oksana N. Medvedeva** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; **Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)**; 77 Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation; ID RISC: 622756, Scopus: 56754888500, ResearcherID: S-8351-2016, ORCID: 0000-0002-0861-0335; medvedeva-on@mail.ru;

Aleksander Yu. Chilikin — postgraduate of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; **Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)**; 77 Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation; Scopus: 57205433319; chilikin.063@gmail.com.

Contribution of the authors:

Medvedeva O.N. — scientific management; research concept; methodology development; writing the draft; final conclusions.

Chilikin A.Yu. — the author made a significant contribution to the concept of the study, data acquisition, analysis and interpretation.

The authors declare no conflicts of interests.

Моделирование тепловых режимов охлаждающих панелей в канализационных насосных станциях

Виталий Иванович Прохоров¹, Мухаммет Азатович Разаков^{1,2}

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

² Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
(НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен новый способ охлаждения некоторых функциональных зон в городской канализационной насосной станции (КНС). Для моделирования стационарного теплового режима панели ПЛИ использовались работы В.А. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомела, В.Н. Богословского, предыдущие работы авторов данной статьи.

Материалы и методы. Представлен физико-математический способ моделирования стационарных и нестационарных тепловых явлений в панели ПЛИ. Исследованы возможности моделирования тепловых режимов ПЛИ панели в зависимости от места установки данного устройства в городской КНС. Приведены теоретические характеристики воздуха, подогретого в этом устройстве, а также некоторые результаты обследования грабельного отделения в высоковольтной городской КНС, расположенной в г. Москве. Проведены расчеты тепловых поступлений и тепловых потерь различных конструктивных элементов панели ПЛИ с помощью теории подобия. Изучена возможность использования иных, в том числе эмпирических данных, для определения некоторых коэффициентов, участвующих в моделировании. Показаны возможности применения различных коэффициентов теплоотдачи при моделировании тепловых режимов панели ПЛИ. Доказана справедливость разработанных моделей посредством сравнения отклонений в уравнении теплового баланса панели ПЛИ.

Результаты. Разработана физико-математическая модель тепловых режимов работы панели ПЛИ для городской КНС. Даны рекомендации о применении различных коэффициентов теплоотдачи при моделировании тепловых режимов панели ПЛИ. Проведен численный эксперимент моделирования одной панели ПЛИ в условиях КНС.

Выводы. Полученная физико-математическая модель может быть использована для инженерных расчетов при подборе характеристик панели ПЛИ, а также уточнения распределения тепловых потоков от панели ПЛИ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лучистая панель, панель ПЛИ, теория подобия, канализационная насосная станция, тепловой режим

Благодарности. Авторы выражают благодарность АО «Мосводоканал» и НИУ «МЭИ» за предоставленное оборудование и возможность обследования канализационных насосных станций в г. Москве в холодный период года.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прохоров В.И., Разаков М.А. Моделирование тепловых режимов охлаждающих панелей в канализационных насосных станциях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1378–1387. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1378-1387

Автор, ответственный за переписку: Виталий Иванович Прохоров, ProhorovVI@mgsu.ru.

Thermal modes simulation of cooling panels in waste water pumping stations

Vitaly I. Prohorov¹, Muhammet A. Razakov^{1,2}

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

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Authors considers a new method of cooling some functional areas in a city sewage pumping station. They have used the works of Isachenko V.A., Osipov V.A., Sukomel A.S., Bogoslovsky V.N. to simulate the PLI panel's stationary thermal regime.

Materials and methods. Authors have considered the mathematical modeling of stationary and non-stationary thermal phenomena in the PLI panel in this paper. There are the possibilities of modeling the thermal modes of the panel PLI which depending on the place of installation of this device. Authors have given the theoretical characteristics of the heated air in

this device and some results of survey in a high voltage urban waste water pumping station in Moscow. There are the heat inputs and heat losses calculations of PLI panel's various structural elements which carried out using the theory of similarity in this article. Researchers considered the possibility of use other empirical results to determine some of the coefficients which involved in modeling. It has been presented different heat transfer coefficients which could be used in thermal conditions model of PLI panel. There are the validation of the developed models which proved by comparing the deviations in the heat balance equation of the PLI panel.

Results. Authors has developed a physical and mathematical model of PLI panel's thermal modes for a sewage pipping station. Authors have given the recommendations on the possibility of using the different heat transfer coefficients in PLI panel's thermal conditions modeling process. A numerical experiment was carried out to simulate one PLI panel under the conditions of a sewage pumping station by researchers in this paper.

Conclusions. According to the information, this physical and mathematical model can be used for engineering calculation when engineer is selecting the characteristics of PLI panel and also it could be used to clarifying the distributions of heat flow from PLI panel.

KEYWORDS: radiant panel, panel PLI, similarity theory, waste water pumping station, thermal conditions

Acknowledgements: The are grateful to JSC Mosvodokanal and MPEI for the equipment and the opportunity to inspect the sewage pumping stations in Moscow during the cold season.

FOR CITATION: Prohorov V.I., Razakov M.A. Thermal modes simulation of cooling panels in waste water pumping stations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1378-1387. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1378-1387 (rus.).

Corresponding author: Vitaly I. Prokhorov, ProkhorovVI@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду сложности теплофизических процессов математическое описание тепловлажностного режима помещения — непростая задача. При создании математической модели необходимо отыскивать большое количество сведений об источниках теплоты и холода. В гражданских зданиях данный процесс обычно упрощается из-за отсутствия многих источников специального технологического характера. В промышленных зданиях при моделировании следует учитывать более сложную технологическую и геометрическую обстановку. Помимо моделирования самих тепловых процессов, требуется отобразить их связь с работой инженерных систем, поддерживающих воздушно-тепловой микроклимат в здании. Функционирование инженерных систем не только напрямую зависит от технологического процесса, но иногда является его составной частью (например, в полиграфии). При моделировании их работы это приходится принимать во внимание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В некоторых промышленных зданиях обеспечение микроклимата усложняется наличием громоздкого технологического оборудования. Например, в публикациях В.М. Уляшевой и других авторов рассмотрена система вентиляции помещения машинного зала, где размещена газотурбинная установка (ГТУ) [1–3]. ГТУ занимает около 20 % объема помещения и служит главным источником избытков теплоты в сооружении. Еще один пример — машинный зал канализационной насосной станции (КНС), в котором находятся насосные установки с высоковольтными электроприводами, они — главные источники тепловых выделений в данном помещении.

Другие источники теплоты в КНС представлены в работах [4, 5]. Согласно требованиям СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» минимальная ширина проходов между электродвигателями должна составлять 0,7 м. Эту норму часто невозможно соблюсти при устройстве местной системы вентиляции (воздушного душирования). Поэтому предлагается подача воздуха непосредственно на электродвигатели с помощью воздуховода равномерной раздачи с отделителями потока [6–9], а также установка охлаждающих лучисто-конвективных панелей ПЛИ в рабочей зоне последнего этажа с выпуском воздуха. На рис. 1 представлена принципиальная схема КНС с указанием места размещения панелей [10]. На рис. 2 показана принципиальная модель панели ПЛИ [11]. Стоит отметить, что тепловые избытки от электродвигателей направляются в рабочую зону на первом этаже, что вызывает только локальное (напротив электродвигателя) увеличение температуры воздуха, а на самом верхнем этаже, где находится тепловой пункт, наблюдается общее увеличение температуры воздуха.

Помимо машинного зала КНС, панель ПЛИ предлагается расположить и в грабельном отделении вместо люка грабельной решетки или под потолком над грабельной решеткой. В зоне над люком отмечаются интенсивные выделения вредных газов и паров влаги, которые способствуют разрушению конструктивных элементов сооружения. На рис. 3, 4 приведены последствия выделения вредных газов и избытков влаги, которые были выявлены в ходе обследования КНС в г. Москве с помощью тепловизора Fluke TiS20+ (США). Данный процесс одинаков с разрушением канализационных трубопроводов, описанным различными исследователями [12–18].

Для моделирования теплообмена между панелью ПЛИ и воздухом в помещении требуется создание математической модели. При этом необходимо учи-

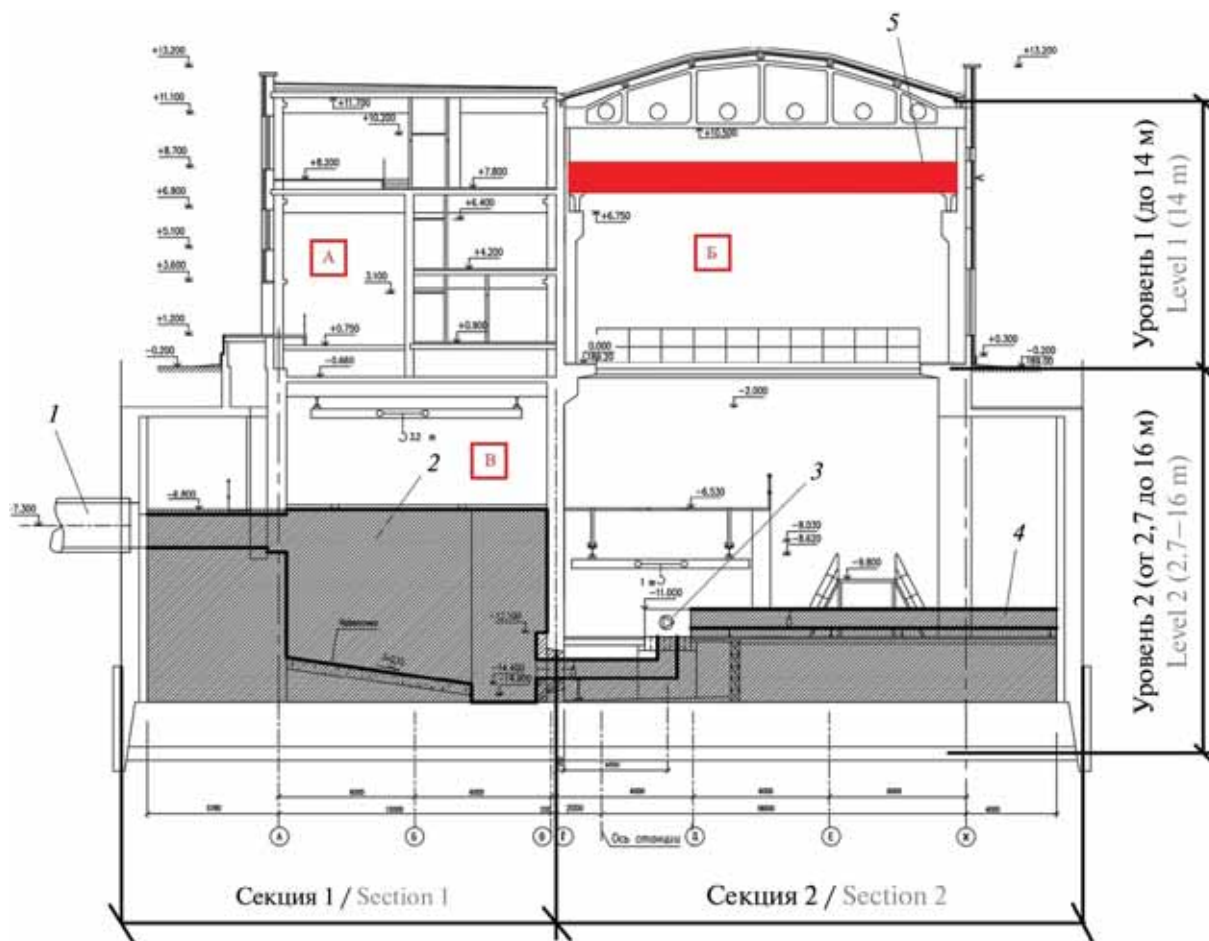


Рис. 1. Разрез КНС: А — административный блок; Б — машинный зал; В — грабельное отделение; 1 — входной трубопровод со сточными водами; 2 — резервуар со сточными водами; 3 — насос для перекачки сточных вод; 4 — напорная линия трубопровода со сточными водами; 5 — место установки панелей ПЛИ в машинном зале

Fig. 1. Section of the SPS: A — civil part of building; B — machine room; C — rake room; 1 — input pipeline with waste water; 2 — tank with waste water; 3 — pump for waste water pumping; 4 — pressure line of the pipeline with waste water; 5 — place of PLI panels installation in the machine room)

тывать, что панель омывается одним и тем же воздухом с двух сторон. Воздух с каждой стороны ПЛИ панели, как правило, характеризуется отличными друг от друга теплофизическими характеристиками. С целью моделирования процесса теплообмена можно использовать уравнение теплопередачи через плоскую стенку при граничных условиях 3-го рода при постоянном значении коэффициентов теплоотдачи, так как теплоотдающей и тепловоспринимающей (внутри ПЛИ панели) средами служит один и тот же воздух. Для расчета теплового режима панели ПЛИ воспользуемся следующим балансовым уравнением:

$$Q_1 = Q_2 \pm Q_3 \pm Q_4 \pm Q_5,$$

где Q_1 — тепловая мощность потока воздуха, входящего в панель ПЛИ, Вт; Q_2 — тепловая мощность потока воздуха, выходящего из панели ПЛИ, Вт; Q_3 — тепловая мощность потока воздуха в помещении, Вт; Q_4 — тепловая мощность потока среды, оказывающей влияние через противоположную внешнюю плоскость панели ПЛИ, Вт; Q_5 — тепловая

мощность потока среды, оказывающей влияние через внешние боковые плоскости панели ПЛИ, Вт.

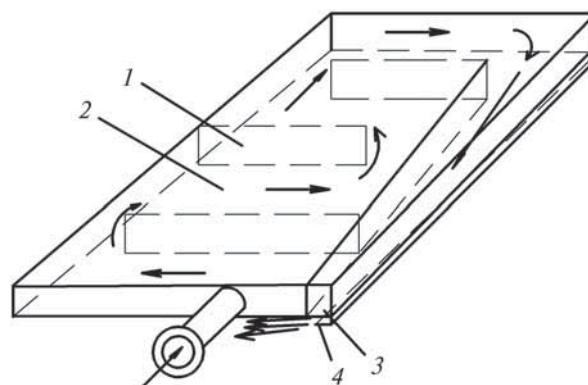


Рис. 2. Принципиальная модель панели ПЛИ: 1 — внутренние перегородки; 2 — каналы для прохода воздуха; 3 — приточная щель; 4 — козырек

Fig. 2. Blueprint of the PLI panel: 1 — inside partitions; 2 — channels for air; 3 — supply slot for air; 4 — visor

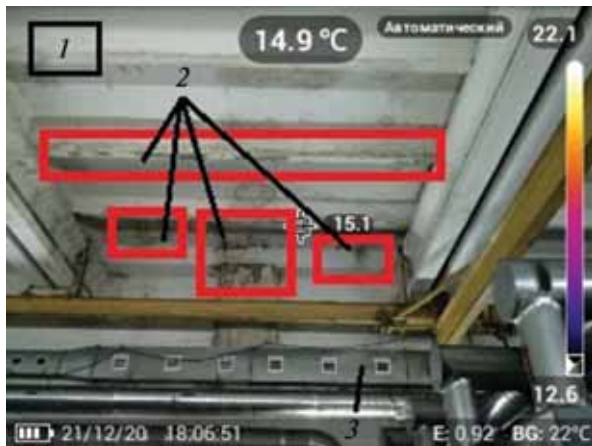


Рис. 3. Фотография зоны над открытым люком в грабельном отделении насосной станции: 1 — межэтажное перекрытие над помещением трансформаторной; 2 — места разрушения плиты перекрытия; 3 — воздуховод вытяжной системы вентиляции

Fig. 3. Photo of the area above the open trapdoor in the rake room of the pumping station: 1 — overlap between floors above the transformer room; 2 — places of the floor slab destruction; 3 — air duct of the exhaust ventilation system



Рис. 4. Термограмма зоны над открытым люком в грабельном отделении насосной станции, полученная с помощью тепловизора Fluke TiS20+

Fig. 4. Thermal image of the zone above the open trapdoor in the rake room of the pumping station which was made with the thermal imager Fluke TiS20+

На рис. 5 представлена схема теплообменных процессов. При расположении панели под потолком грабельного отделения и в машинном зале температура окружающего воздуха для Q_4 , Q_5 одинакова. Если панель размещена вместо люка в грабельном отделении, температуру в коэффициенте Q_5 можно принять равной температуре пола в рабочей зоне грабельного отделения. Когда панель находится под потолком теплообмен ΔQ_{3-1} , может заменяться на теплообмен между помещением над грабельным от-

делением (трансформаторной) и панелью ПЛИ или иным помещением, находящимся над грабельным отделением.

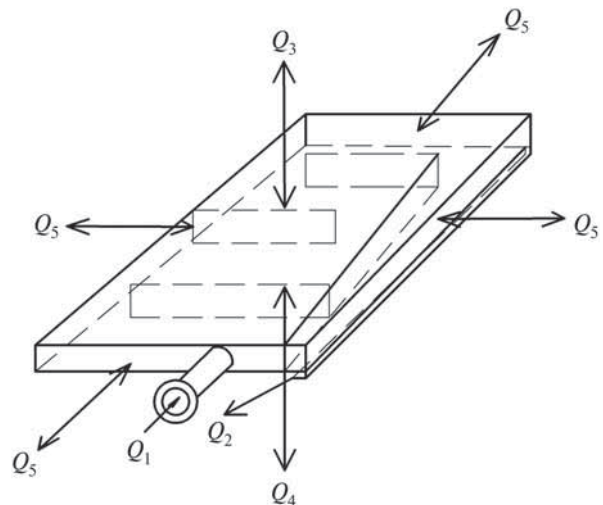


Рис. 5. Теплообмен панели ПЛИ с окружающими средами (воздухом, конструктивными элементами здания)

Fig. 5. Heat exchange process of the PLI panel and the environment (air, structural elements of the building)

Согласно рис. 5 получаются следующие теплообменные процессы:

$$\Delta Q_{1-2} = \Delta Q_{5-1} \pm \Delta Q_{4-1} \pm \Delta Q_{3-1},$$

где ΔQ_{1-2} — количество теплоты, полученное в результате теплообменных процессов панели ПЛИ и окружающих сред, Вт; ΔQ_{5-1} — теплообмен между воздухом или полом в помещении и воздухом в панели ПЛИ, Вт; ΔQ_{4-1} — теплообмен между воздухом (оказывающим влияние через противоположную внешнюю плоскость) в помещении и воздухом в панели ПЛИ, Вт; ΔQ_{3-1} — теплообмен между воздухом в помещении и воздухом в панели ПЛИ, Вт.

Можно отметить, что при теплообмене между полом в помещении и воздухом в панели ПЛИ для моделирования необходимо применение стандартного уравнения теплопроводности. Пол в данном случае нагревает три грани панели при непосредственном контакте, но одна вертикальная грань будет нагреваться воздухом с лотка со сточными водами. С целью определения количества теплоты, полученного от теплообменных процессов панели ПЛИ с окружающими средами, применяется уравнение:

$$\Delta Q_{1-2} = c_m \rho V (t_1 - t_2) \delta t,$$

где c_m — массовая теплоемкость воздуха, кДж/кгК; ρ — плотность воздуха, кг/м³; V — объемный расход воздуха, м³/с; t_1 — температура входящего (приточного) в панель ПЛИ воздуха, °С; t_2 — температура воздуха на выходе из панели ПЛИ, °С; δt — время теплопередачи, с.

Теплообмен между воздухом в грабельном отделении или воздухом (воздухом с газовой фазой

сточных вод) внутри панели ПЛИ ΔQ_{3-1} , ΔQ_{4-1} , ΔQ_{5-1} (случай без пола) рассчитывается по формуле [19]:

$$\Delta Q = \frac{\Delta t \delta F \delta \tau}{\frac{(\alpha_{li} + \alpha_{ki})(\alpha_{li+1} + \alpha_{ki+1})}{(\alpha_{li} + \alpha_{ki}) + (\alpha_{li+1} + \alpha_{ki+1})} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta x_i}{\lambda_i}},$$

где Δt — разность температуры воздуха внутри и воздуха снаружи ПЛИ панели, °C; δF — площадь поверхности теплообмена, м²; $\delta \tau$ — время теплопередачи, с; α_{ki} — конвективная составляющая теплоотдачи i -ной и $i+1$ поверхности, Вт/м²°C; α_{li} — лучистая составляющая теплоотдачи i -ной и $i+1$ поверхности, Вт/м²°C; λ_i — коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции панели ПЛИ, Вт/мК; δx_i — толщина материала i -го слоя конструкции панели ПЛИ, м.

Так как в реальных переменных условиях коэффициент лучистой теплоотдачи (наружной и внутренней) практически невозможно вычислить, то его определение предлагается производить по формуле Стефана – Больцмана [20, 21]:

$$\alpha_{li} = \frac{Q_{\text{л}}}{t_{\text{пов.1}} - t_{\text{пов.2}}} = \frac{\frac{1}{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]} \varphi C_o \times \left[\left(\frac{T_{\text{пов.1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов.2}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{пов.1}} - t_{\text{пов.2}}},$$

где $t_{\text{пов.1}}$ — температура теплообменной поверхности № 1, °C; $t_{\text{пов.2}}$ — температура теплообменной поверхности № 2, °C; ε_1 — степень черноты серого тела № 1; ε_2 — степень черноты серого тела № 2; C_o — коэффициент излучения абсолютного черного тела, Вт/м²К⁴; φ — коэффициент облученности одного тела другим телом.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки к внутренней среде (входящего приточного воздуха) в панели ПЛИ следует определять подобно течению воздуха в канале квадратного поперечного сечения с помощью теории подобия [19]:

$$\alpha_{ki} = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_3},$$

где Nu — число Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/мК; d_3 — эквивалентный диаметр канала, м.

Согласно сведениям М.А. Михеевой, В.П. Исаченко и других авторов для квадратных сечений при расчете коэффициента конвективной теплоотдачи возможно использование значения эквивалентного диаметра, который дает удовлетворительные результаты значений в сравнении с экспериментальными данными и может применяться в инженерных расчетах [19]. Поэтому для определения эквивалентно-

го диаметра трубопровода прямоугольного сечения используется следующая формула:

$$d_{\text{экв}} = \frac{2ab}{a+b},$$

где a — длина прямоугольника, м; b — ширина прямоугольника, м.

Общий случай критериального уравнения конвективного теплообмена представлен выражением [19]:

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{Gr}^b \text{Pr}^m \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{cm}}} \right)^{0,25},$$

где c , n , b , m — экспериментальные числовые показатели (ниже приведены конкретные значения для панели ПЛИ); Re — число Рейнольдса; Gr — число Грасгофа; Pr — число Прандтля; $\text{Pr}_{\text{ст}}$ — число Прандтля при температуре стенки; $(\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}$ — поправка, учитывающая направление теплового потока.

Другие основные числа подобия, используемые при установлении коэффициента конвективной теплоотдачи, рассчитываются следующими формулами [19]:

$$\text{Re} = \frac{w d_3}{\nu} \text{ и } \text{Gr} = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2} = \frac{g l^3 \Delta T}{T \nu^2},$$

где w — средняя скорость течения воздуха внутри панели ПЛИ, м/с; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; β — коэффициент объемного расширения, К⁻¹; ΔT — разность температуры между поверхностью и наружной средой (воздухом), К; T — температура внутренней среды, К.

Для определения скорости течения воздуха внутри панели ПЛИ используется выражение:

$$\nu = \frac{L}{3600 f},$$

где L — расход воздуха, м³/ч; f — средняя площадь поперечного сечения внутренних каналов для прохода воздуха, м².

Площадь поперечного сечения для прямоугольного канала рассчитывается по известной формуле $f = ab$.

Характер движения воздуха внутри панели (режим) может быть ламинарным или турбулентным, в связи с этим экспериментальные числовые показатели у критериального уравнения могут быть различны. Для ламинарного режима ($\text{Re} < 2300$, $\text{Gr} \cdot \text{Pr} < 8 \cdot 10^5$) применяется выражение [19]:

$$\text{Nu} = 0,15 \text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{cm}}} \right)^{0,25},$$

Для воздуха при вязкостно-гравитационном ($\text{Re} < 2300$; $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 8 \cdot 10^5$) и турбулентном ($\text{Re} > 10^4$)

режимах течения воздуха возможно применение следующих выражений:

Вязкостно-гравитационный [19]:

$$Nu = 0,13Re^{0,33}Gr^{0,1}.$$

Турбулентный режим [19]:

$$Nu = 0,018Re^{0,8}\epsilon_l.$$

Также существует поправочный коэффициент ϵ , который выявляется в зависимости от вида участка. Для участков воздуховода ϵ_l используется формула:

$$\epsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d},$$

где l — длина прямого участка, м; d — эквивалентный диаметр участка воздуховода, м.

Для изогнутых участков применяется коэффициент $\epsilon_{из}$, на который умножается коэффициент конвективной теплоотдачи. Он вычисляется по формуле:

$$\epsilon_{из} = 1 + \frac{1,77}{d/R},$$

где d — эквивалентный диаметр воздуховода, м; R — радиус змеевика, м.

Возможно считать для первоначальных расчетов, что радиус змеевика с прямоугольным поперечным сечением трубы эквивалентен радиусу змеевика с круглым поперечным сечением трубы. Для панели ПЛИ также предлагается использование коэффициента $\epsilon_{из}$ ввиду подобности устройства змеевиковых каналов и каналов внутри панели. Коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной среды (воздуха в помещении) к панели ПЛИ можно определять по экспериментальным данным обследований ограждающих конструкций В.Н. Богословского. Этот коэффициент, по его информации, зависит от ориентации нагретой поверхности и рассчитывается по выражениям [22]: для горизонтальной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх:

$$\alpha_{к.н.} = 1,16\sqrt{t_{ст1} - t_{в}}.$$

Для горизонтальной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз:

$$\alpha_{к.н.} = 2,26\sqrt{t_{ст1} - t_{в}}.$$

Для вертикальной поверхности:

$$\alpha_{к.н.} = 1,66\sqrt{t_{ст1} - t_{в}},$$

где $t_{в}$ — температура воздуха в помещении; $t_{ст}$ — температура на поверхности стенки панели ПЛИ, которая в первом приближении может быть принята равной температуре воздуха внутри панели.

Также возможно применение критериального уравнения конвективного теплообмена и теории подобия. При $10^3 < GrPr < 10^9$ и числе $Pr \approx 0,7$ для

вертикальной поверхности возможно использование выражения из работы [19]:

$$Nu = 0,695Gr^{0,25}.$$

При $Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^{10}$ и числе $Pr \approx 0,7$ применяется формула:

$$Nu = 0,133Gr^{0,33}.$$

Для горизонтальных поверхностей при условии $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ и числе $Pr \approx 0,7$ справедливо выражение:

$$Nu = 0,46Gr^{0,5}.$$

Также необходимо учитывать, что если нагретая сторона направлена вверх, то коэффициент теплоотдачи нужно увеличить на 30 %, а при направлении вниз уменьшить на 30 % [22]. В качестве определяющей температуры принимается температура среды в помещении или канале.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В высоковольтных КНС из-за особенностей сооружений, массивности конструкций и наличия мощного потока воды, изменение теплового режима здания происходит менее интенсивно, чем в аналогичных сооружениях иного назначения. Поэтому при моделировании нестационарного теплового режима панели ПЛИ для КНС можно принять, что данный процесс является квазистационарным [23], и при расчетах считать, что температура воздуха, выходящего из панели ПЛИ, будет зависима от температуры окружающего панель воздуха, изменение которой, в свою очередь, может быть описано функцией от времени.

В табл. 1 представлены возможные варианты расчета коэффициента теплоотдачи при различных расположениях ПЛИ панели в здании КНС.

В табл. 2 описаны результаты численного моделирования теплового режима одной панели ПЛИ в зависимости от ее расположения в городской КНС при определенных стационарных условиях и расходе воздуха 250 кг/ч.

В табл. 3 приведено распределение тепловых поступлений в панель ПЛИ в зависимости от ее расположения в городской КНС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный численный эксперимент доказывает справедливость разработанной математической модели. Точность результатов находится в пределах инженерной погрешности $\pm 10\%$.

Расположение панели ПЛИ в здании канализационной насосной станции влияет на ее стационарный тепловой режим. При нахождении устройства на последнем этаже машинного зала количество тепловых поступлений на большие по площади плоскости (передняя и задняя) составляет 87,5 % от сум-

марных поступлений теплоты. При расположении панели под потолком грабельного отделения 70,6 % тепловых поступлений приходится на переднюю часть панели. Если устройство установлено вместо

люка в лотке со сточными водами, то большая часть тепловых поступлений — 94,2 % приходится на поступления теплоты от боковых граней — пола грабельного отделения с температурой 23 °С.

Табл. 1. Таблица возможности применения различных коэффициентов теплоотдачи при моделировании тепловых режимов панели ПЛИ в КНС

Table 1. Table of the heat transfer coefficients use possibility in modeling process of the PLI panel thermal modes at the pump station

Вариант расположения ПЛИ панели в помещении PLI panel location option in the room	Коэффициент конвективной теплоотдачи на наружную поверхность 4 Coefficient of convective heat transfer to the outer surface 4	Коэффициент конвективной теплоотдачи на наружную поверхность 3 Coefficient of convective heat transfer to the outer surface 3	Коэффициент конвективной теплоотдачи на внутреннюю поверхность Coefficient of convective heat transfer to the inner surface	Коэффициент лучистой теплоотдачи на наружную поверхность 4 Radiant heat transfer coefficient to the outer surface 4	Коэффициент лучистой теплоотдачи на наружную поверхность 3 Radiant heat transfer coefficient to the outer surface 3	Коэффициент лучистой теплоотдачи на внутреннюю поверхность Radiant heat transfer coefficient to the inner surface
Панель расположена вертикально в рабочей зоне последнего этажа The panel is located vertically in the working area of the last floor	+	+	+	—	+	—
Панель расположена горизонтально под потолком в грабельном отделении The panel is located horizontally under the ceiling in the rake compartment	+	—	+	+	—	—
Панель расположена горизонтально вместо люка в грабельном отделении The panel is located horizontally instead of a hatch in the rake compartment	+	+	+	+	—	+

Примечание: + — применение данного показателя обязательно; — — применение данного показателя не обязательно, но возможно.
Note: + — the use of this indicator is mandatory; — — the use of this indicator is optional, but possible.

Табл. 2. Результаты численного эксперимента моделирования одной панели ПЛИ при условиях КНС

Table 2. Results of a numerical experiment for PLI panel modeling process under the conditions at a sewage pumping station

Вариант расположения ПЛИ панели в помещении PLI panel location option in the room	$t_{\text{окр}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{1-2}, ^\circ\text{C}$	$\Delta Q_{1-2}/\sum \Delta Q, \%$
Панель расположена вертикально в рабочей зоне последнего этажа The panel is located vertically in the working area of the last floor	30	1,0	4,2
Панель расположена горизонтально под потолком в грабельном отделении The panel is located horizontally under the ceiling in the rake compartment	23/24	0,15	1,45
Панель расположена горизонтально вместо люка в грабельном отделении The panel is located horizontally instead of a hatch in the rake compartment	23/25	4	2,3

Табл. 3. Таблица распределения тепловых потоков от панели ПЛИ

Table 3. Information of heat flow distribution from the PLI panel

Вариант расположения ПЛИ панели в помещении PLI panel location option in the room	$\Delta Q_{3-1}, \%$	$\Delta Q_{4-1}, \%$	$\Delta Q_{3-1}, \%$
Панель расположена вертикально в рабочей зоне последнего этажа The panel is located vertically in the working area of the last floor	12,5	27,2	60,3
Панель расположена горизонтально под потолком в грабельном отделении The panel is located horizontally under the ceiling in the rake compartment	21,0	70,6	8,4
Панель расположена горизонтально вместо люка в грабельном отделении The panel is located horizontally instead of a hatch in the rake compartment	94,2	5,0	0,8

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уляшева В.М. Совершенствование методов расчета тепловоздушных процессов на объектах транспортировки газа : монография. СПб. : СПбГАСУ, 2011.
2. Позин Г.М., Уляшева В.М. Воздушно-тепловой режим помещений с источниками тепловыделения // Приволжский научный журнал. 2013. № 1 (25). С. 80–84.
3. Уляшева В.М. Приближенное и численное моделирование тепловоздушных процессов в помещениях с источниками тепловыделения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 3 (627). С. 76–81.
4. Prokhorov V., Rymarov A., Razakov M., Kosarev A. Specialized method of calculating heat input from wastewater in the premises of the sewage pumping stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 032073. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032073
5. Прохоров В.И., Разаков М.А. Источники теплоты и холода при моделировании теплового режима канализационной насосной станции // Системные технологии. 2020. № 1 (34). С. 43–47.
6. Kashurkin A., Prokhorov V. On the mutual influence of local resistances in the distribution of ventilation air // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 03039. DOI: 10.1051/mateconf/201825103039
7. Тертичник Е.И. Расчет воздухопроводов равномерной раздачи и удаления воздуха с отверстиями в стенке // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 346–355.
8. Хужаев П.С., Сулейманов З.А., Сулейманова Н.А., Почтоев М.М. Воздуховод равномерной раздачи постоянного статического давления // Вестник Таджикского технического университета. 2015. № 4 (32). С. 151–154.
9. Почтоев М.М., Сулейманов З.А. Воздуховод равномерной раздачи // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2014. № 4. С. 68–72.
10. Разаков М.А. Об организации воздухообмена в городской канализационной насосной станции // Сб. док. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ – МГСУ. М. : НИУ МГСУ, 2019. С. 104–106.
11. Патент № 255524 СССР МПК F24f 13/06. Панель ПЛИ / В.И. Прохоров; заяв. и патентообл. В.И. Прохоров. № 837847/29-14; заявл. 17.05.1963; опубл. 28.11.1972, Бюл. № 36.
12. Вавилов В.Е., Дзиминская О.Ч., Жакевич М.О. Газовая коррозия самотечных канализационных коллекторов // Великие реки: 2015 : тр. Конгресса 17 Междунар. науч.-пром. форума: в 3-х т. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2015. С. 179–181.
13. Чижик К.И., Семенов К.В., Белоокая Н.В. Микробиологическая коррозия канализационных камер и коллекторов // Вестник ИГТУ. 2014. № 11 (94). С. 180–183.
14. Орлов В.А., Крашенина Ю.Е. Запах в самотечных водоотводящих сетях и мероприятия по борьбе с ним // Системные технологии. 2019. № 1 (30). С. 41–46.
15. Мкртчян Т.М., Серпокрылов Е.Н. Обоснование конструкции самовращающегося аэратора для самотечных коллекторов сетей водоотведения // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. № S4 (13). С. 51–52. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.15
16. Орлов В.А., Саймуллов А.В., Мельник О.В. Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 3. С. 409–431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431
17. Parker W.J., Ryan H. A tracer study of headspace ventilation in a collector sewer // Journal of the Air & Waste Management Association. 2001. Vol. 51. Issue 4. Pp. 581–592. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464290
18. Vasilyev V., Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. Pp. 1319–1324. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1319
19. Исаченко В.А., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник. М. : ООО «ТИД “Арис”», 2014. 416 с.
20. Сизов В.Д., Нестеров Л.В., Копко В.М. Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 1. С. 46–55.
21. Редько А.А., Куликова Н.В., Бурда Ю.А., Павловский С.В., Редько А.Ф., Пивненко Ю.А. Численный анализ параметров лучистой системы отопления с излучающими панелями // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 1 (45). С. 59–70. DOI: 10.5281/zenodo.3713405
22. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. СПб. : АБОК Северо-Запад, 2006. 399 с.
23. Кориунов О.В., Слитков М.Н., Будадин О.Н. Квазистационарность процессов теплопроводности // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 6. С. 23–26.

Поступила в редакцию 9 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 16 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Виталий Иванович Прохоров** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8172-9418, Scopus: 7102859791, ResearcherID: Y-2708-2019, ORCID: 0000-0003-1650-197X; ProhorovVI@mgsu.ru;

Мухаммет Азатович Разаков — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ассистент кафедры энергетические и гидротехнические сооружения; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»)**; 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8054-6877, Scopus: 57203503197, ResearcherID: L-4098-2018, ORCID: 0000-0002-0419-4522; muhammet@nl.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ulyasheva V.M. *Improvement of methods for calculating warm-air processes at gas transportation facilities: monography*. St. Petersburg, SPbGASU, 2011. (rus.).
2. Pozin G.M., Ulyasheva V.M. Air-thermal conditions of rooms with heat emission sources. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2013; 1(25):80-84. (rus.).
3. Ulyasheva V.M. Approximate and numerical modeling of warm-air processes in rooms with heat sources. *Proceedings of higher education institutions. Constriction Series*. 2011; 3(627):76-81. (rus.).
4. Prokhorov V., Rymarov A., Razakov M., Kosarev A. Specialized method of calculating heat input from wastewater in the premises of the sewage pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:032073. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032073
5. Prokhorov V.I., Razakov M.A. Heat sources at the thermal regime modelling of urban sewage pumping station. *System Technologies*. 2020; 1(34):43-47. (rus.).
6. Kashurkin A., Prokhorov V. On the mutual influence of local resistances in the distribution of ventilation air. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:03039. DOI: 10.1051/mateconf/201825103039
7. Tertichnik E. Calculation of air lines of uniform distribution and removal of air apertures in a wall. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 7:346-355. (rus.).
8. Khuzhaev P.S., Suleimanov Z.F., Suleimanova N.F., Pochchoev M.M. Air duct for uniform distribution of constant static pressure. *Bulletin of the Tajik Technical University*. 2015; 4(32):151-154. (rus.).
9. Pochchoev M.M., Suleimanov Z.F. Air duct of uniform distribution. *Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov*. 2014; 4:68-72. (rus.).
10. Razakov M.A. About the ventilation system in urban wastewater pumping station. *Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Faculty of Water Supply and Wastewater Disposal of MISS – MGSU*. Moscow, 2019; 104-106. (rus.).
11. Patent No. 255524 USSR, MPK F24f 13/06. *Panel PLI / V.I. Prokhorov*; applicant and patentee of V.I. Prokhorov. No. 837847/29-14; appl. 17.05.1963; publ. 28.11.1972. Bull. No. 36. (rus.).
12. Vavilov V.E., Dziminskaite O.Ch., Gakevich M.O. Gas corrosion of gravity sewers. *Great rivers: 2015 proceedings of the Congress of the 17th International Scientific and Industrial Forum: in 3 volumes*. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2015; 179-181. (rus.).
13. Chizhik K., Semenov K., Belookaya N. Microbiological corrosion of sewage influent chambers and collectors. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014; 11(94):180-183. (rus.).
14. Orlov V.A., Krashenina Yu.E. The smell in gravity drainage networks and activities to combat it. *System Technologies*. 2019; 1(30):41-46. (rus.).
15. Mkrtchyan T.M., Serpokrillov E. Justification of design of the self-rotating aerator for gravity network of sewerage. *Proceedings of Samara State University of architecture and building constructions*. 2013; S4(13):51-52. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.15 (rus.).
16. Orlov V.A., Saimollov A.V., Melnik O.V. A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 15(3):409-431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431 (rus.).
17. Parker W.J., Ryan H. A Tracer Study of Head-space Ventilation in a Collector Sewer. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2001; 51(4):581-592. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464290
18. Vasilyev V., Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:1319-1324. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1319
19. Isachenko V.A., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat transfer: textbook*. Moscow, OOO “TID” Aris”, 2014; 416. (rus.).

20. Sizov V.D., Nesterov L.V., Kopko V.M. Effect of the screens radiant reflectance on thermal transport process in the cladding structures. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2016; 59(1):46-55. (rus.).

21. Redko A.A., Kulikova N.V., Burda Yu.A., Pavlovsky S.V., Redko O.F., Pivnenko Yu.A. Numerical analysis of parameters of the radiant heating system with

radiating panels. *Problems of the Regional Energetics*. 2020; 1(45):59-70. DOI: 10.5281/zenodo.3713405 (rus.).

22. Bogoslovsky V.N. *Building thermal physics*. St. Petersburg, ABOK North-West, 2006; 399. (rus.).

23. Korshunov O.V., Slitkov M.N., Budadin O.N. Quasi-stationarity of heat conductivity processes. *Energy Safety and Energy Economy*. 2011; 6:23-26. (rus.).

Received July 9, 2021.

Adopted in revised form on August 16, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

B I O N O T E S: **Vitaly I. Prohorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8172-9418, Scopus: 7102859791, ResearcherID: Y-2708-2019, ORCID: 0000-0003-1650-197X; ProhorovVI@mgsu.ru;

Muhammet A. Razakov — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Assistant of Energy Structures and Hydro-Technical Utilities Department; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennay st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8054-6877, Scopus: 57203503197, ResearcherID: L-4098-2018, ORCID: 0000-0002-0419-4522; muhammet@nln.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Экономико-математическая модель выбора системы газоснабжения на основе биометана и природного газа

Денис Юрьевич Суслов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Перспективным направлением развития систем газоснабжения, получившим широкое распространение в развитых странах мира, является применение альтернативного источника энергии — биометана. Эффективное использование биометана требует разработки научных положений и рекомендаций для систем газоснабжения с учетом технико-экономических факторов. Поэтому актуальна разработка экономико-математической модели выбора способа газификации и определение области рационального применения систем газоснабжения биометаном.

Материалы и методы. Для разработки экономико-математической модели выбора способа газоснабжения населенных пунктов использовались методы математического моделирования и параметрической оптимизации. Реализация экономико-математической модели производилась в программном комплексе MathCAD. Проведена математическая и графическая обработка полученных результатов.

Результаты. Разработана экономико-математическая модель выбора системы газоснабжения населенных пунктов. В основу модели положен технико-экономический расчет приведенных затрат в системы газоснабжения сетевым природным газом и биометаном. С помощью данной модели определены технические параметры системы газоснабжения биометаном: критическая протяженность газопровода-отвода, радиус действия биометановой установки по субстрату, расход биометана, длина газопровода для подачи биометана и затраты в систему газоснабжения. Получен график зависимости критической протяженности газопровода-отвода от численности населения при разных плотностях субстратообразования, который позволяет определить область рационального применения биометана для газоснабжения населенных пунктов. Установлено, что для сельского поселения с численностью 5000 чел. критическая протяженность газопровода-отвода составляет 24,820–28,044 км, для поселка городского типа с населением 15 000 чел. — 50,923–64,677 км, а для города с населением 30 000 чел. — 89,617–127,279 км.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы с целью разработки и проектирования систем газоснабжения на основе биометана для газификации населенных пунктов, удаленных от магистральных газопроводов. Применение биометана позволяет газифицировать населенные пункты в развитых сельскохозяйственных регионах и повысить эффективность газотранспортной системы РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система газоснабжения, природный газ, биометан, экономико-математическая модель, протяженность газопровода-отвода

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суслов Д.Ю. Экономико-математическая модель выбора системы газоснабжения на основе биометана и природного газа // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 10. С. 1388–1396. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1388-1396

Автор, ответственный за переписку: Денис Юрьевич Суслов, suslov1687@mail.ru.

Economic and mathematical model of selecting a gas supply system based on biomethane and natural gas

Denis Yu. Suslov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A promising direction in the development of gas supply systems, which is widely used in the developed countries of the world, is the use of an alternative energy source — biomethane. The effective use of biomethane requires the development of scientific provisions and recommendations for the use of biomethane gas supply systems, taking into account technical and economic factors. Therefore, it is urgent to develop an economic and mathematical model for choosing a gasification method and determining the area of rational use of gas supply systems with biomethane.

Materials and methods. To develop an economic and mathematical model for choosing a method for gasification of settlements, methods of mathematical modeling and parametric optimization were used. The implementation of the economic and

mathematical model was carried out in the Mathcad software package. Mathematical and graphic processing of the results obtained was carried out.

Results. An economic and mathematical model was developed for determining the rational area of application of biomethane for gas supply to settlements. The model is based on the technical and economic calculation of the reduced costs for gas supply systems with network natural gas and biomethane. Using the developed model, the technical parameters of the biomethane gas supply system were determined: the critical length of the gas pipeline branch, the radius of the biomethane plant, the biomethane consumption, the length of the gas pipeline for the biomethane supply, and the reduced costs to the gas supply system. A graph of the dependence of the critical length of the gas pipeline branch on the population size has been obtained, which makes it possible to determine the area of rational use of biomethane for gas supply to settlements. It was found that for a rural settlement with a population of 5,000 people, the critical length of the gas pipeline branch is 24.820–28.044 km, for an urban-type settlement with a population of 15,000 people, the length of the gas pipeline branch is 50.923–64.677 km, and for a city with a population of 30,000 people — 89.617–127.279 km.

Conclusions. The results obtained can be used for the development and design of gas supply systems based on biomethane for the gasification of settlements remote from the main gas pipelines. The use of biomethane makes it possible to gasify settlements in developed agricultural regions and to increase the efficiency of the gas transportation system of the Russian Federation.

KEYWORDS: gas supply system, natural gas, biomethane, economic and mathematical model, length of the gas pipeline branch

FOR CITATION: Suslov D.Yu. Economic and mathematical model of selecting a gas supply system based on biomethane and natural gas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1388-1396. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1388-1396 (rus.).

Corresponding author: Denis Yu. Suslov, suslov1687@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Газовая промышленность — одна из важнейших отраслей экономики РФ, от надежной работы которой зависит развитие страны в целом. Приоритетной программой развития системы газоснабжения является газификация регионов, отдаленных от существующих систем газоснабжения, а также использование альтернативных энергоносителей: сжиженного природного газа (СПГ), компримированного природного газа (КПГ) и сжиженного углеводородного газа (СУГ). Одно из перспективных направлений развития систем газоснабжения, получившее широкое применение в странах Европы и Северной Америки, — использование биометана [1–5]. Биометан — это газообразный продукт, аналогичный по компонентному составу природному газу (ПГ), образуется при анаэробной ферментации органических отходов различного производства и энергетических растений [6–8]. Для определения целесообразности применения того или иного альтернативного энергоносителя, как правило, выполняют технико-экономическое обоснование.

Технико-экономическими расчетами альтернативных способов газоснабжения населенных пунктов занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Работы отечественных ученых посвящены сравнению вариантов газоснабжения ПГ, СУГ, СПГ, а также газозвоздушной смеси [9–12]. В трудах О.Н. Медведевой [9, 10] проведено сравнение использования СПГ и сетевого ПГ для газоснабжения населенных пунктов. В публикации Н.Н. Осиповой [11] рассматривается теоретическое обоснование применения систем газоснабжения СУГ, определены рациональные области их использования для сельских населенных пунктов. В исследовании [12] авторами произведен технико-экономический расчет

системы газоснабжения с помощью газозвоздушных смесей.

Вопросами использования биометана в системах газоснабжения занимаются в основном зарубежные ученые, их труды посвящены применению биометана в газовых сетях своей страны. Так, в статье [13] приведен экономический расчет получения биометана из отходов предприятий по производству пальмового масла и рассмотрена возможность использования биометана для газоснабжения населенных пунктов Малайзии. Определена экономическая эффективность производства биометана и подачи его в магистральные газопроводы Латвии [14]. Установлено, что биометан примерно на 19 % дороже, чем ПГ. Изучена возможность производства биометана в небольших установках Ирландии, при этом предлагается передвижной модуль для очистки биогаза до состава биометана [15]. Выполнено экономическое сравнение биометановых установок (БМУ) в Ирландии в зависимости от вида исходного субстрата [16]. В работе [17] определена технико-экономическая эффективность использования биометана в централизованных системах газоснабжения Великобритании. Другими авторами изучен потенциальный объем производства биометана из разных видов исходного субстрата Сицилии [18]. В труде [19] рассматривается возможность использования биометана в бытовых газовых приборах Тайланда. Авторами разработаны положения по производству, хранению и доставке биометана, а также печь для применения биометана. В статье [20] определена экономическая эффективность подачи биометана в газовые сети Италии и преобразование его в газомоторное топливо. Исследования [21, 22] посвящены технико-экономическому анализу получения биометана в зависимости от размеров биометановой установки.

Выполнена технико-экономическая оценка использования хранилищ биометана [23].

Однако данные исследования, как правило, имеют частный индивидуальный подход, учитывают инфраструктуру данного региона или страны и не применимы для других условий эксплуатации. Кроме того, в большинстве работ получены сугубо экономические результаты, которые не учитывают технологические параметры системы газоснабжения. Определение области эффективного применения систем газоснабжения биометаном в населенных пунктах РФ требует технико-экономического сравнения данных систем с традиционными системами газоснабжения сетевым ПГ.

Следовательно, актуальна разработка математической модели выбора способа газификации населенных пунктов и определение рациональной области применения систем газоснабжения биометаном в РФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях разработки экономико-математической модели выбора способа газоснабжения населенных пунктов применялись методы математического моделирования и параметрической оптимизации из условия сравнения суммарных приведенных затрат в системы газоснабжения.

Система газоснабжения биометаном представляет собой технологический комплекс сетей и сооружений, учитывающий доставку исходного субстрата в биометановые установки, производство биогаза, его очистку до состава биометана, транспортировку биометана по газопроводам, его подачу в сети газораспределения и затем сети газопотребления. При оценке возможности применения биометана для газоснабжения населенных пунктов важным параметром является удаленность населенного пункта от существующих систем газоснабжения.

Для определения эффективности систем газоснабжения биометаном примем приведенные затраты (З, руб./год), которые широко используются для оценки эффективности разрабатываемых систем газоснабжения [24–26]:

$$З = И + ЕК, \quad (1)$$

где И — эксплуатационные затраты, руб./год; Е — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; К — капитальные затраты, руб.

С целью установления плотности субстратобразования использовались статистические данные поголовья скота на территории Кировской области и нормы образования органических отходов для разных групп животных и птицы.

Для решения экономико-математической модели выбора способа газоснабжения населенных пунктов применялось математическое программное обеспечение MathCAD.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработаем экономико-математическую модель выбора области рационального применения биометана для газоснабжения населенных пунктов.

Приведенные затраты в систему газоснабжения сетевым ПГ рассчитываются с помощью выражения, руб.:

$$З_{ПГ} = З_{д+мг} + З_{го} + З_{грс} + З_{сгр} + З_{сгп}, \quad (2)$$

где $З_{д+мг}$ — затраты на добычу и магистральный транспорт газа, руб.; $З_{го}$ — затраты в газопровод-отвод, руб.; $З_{грс}$ — затраты в газораспределительную станцию (ГРС), руб.; $З_{сгр}$ — затраты в систему газораспределения, руб.; $З_{сгп}$ — затраты в систему газопотребления, руб.

Для определения приведенных затрат в систему газоснабжения биометаном предложено выражение, учитывающее полный технологический комплекс данной системы:

$$З_{бм} = З_{бму} + З_{тс} + З_{гб} + З_{сп} + З_{сгр} + З_{сгп}, \quad (3)$$

где $З_{бму}$ — затраты в биометановую установку, руб.; $З_{тс}$ — затраты в транспортировку субстрата, руб.; $З_{гб}$ — затраты в газопроводы биометана, руб.; $З_{сп}$ — затраты в станцию подачи биометана, руб.; $З_{сгр}$ — затраты в систему газораспределения, руб.; $З_{сгп}$ — затраты в систему газопотребления, руб.

Так как системы газораспределения и газопотребления при газоснабжении биометаном конструктивно и технологически не отличаются от таких систем при газоснабжении ПГ, то при разработке экономико-математической модели затраты в данные системы можно не учитывать.

Тогда целевая функция установления приведенных затрат в систему газоснабжения ПГ имеет вид:

$$З_{ПГ} = З_{д+мг} + З_{го} + З_{грс}. \quad (4)$$

Затраты на добычу и магистральный транспорт газа определяются стоимостью ПГ:

$$З_{д+мг} = c_{ПГ} Q_{Г}, \quad (5)$$

где $c_{ПГ}$ — стоимость ПГ, руб./м³; $Q_{Г}$ — годовой расход природного газа, м³.

Затраты в газопровод-отвод зависят от удаленности населенного пункта от существующих магистральных газопроводов и стоимости его строительства:

$$З_{го} = L_{го} K_{го}^{уд}, \quad (6)$$

где $L_{го}$ — протяженность газопровода-отвода, м; $K_{го}^{уд}$ — затраты в строительство 1 м газопровода-отвода, руб./м.

На основе проведенного анализа реальных проектов ГРС РФ получено выражение для определения затрат в ГРС в зависимости от производительности:

$$З_{грс} = 6 \cdot 10^8 \ln(Q_{Г}) + 4 \cdot 10^7. \quad (7)$$

Целевая функция определения приведенных затрат в систему газоснабжения биометаном имеет вид:

$$Z_{\text{бм}} = Z_{\text{бмг}} + Z_{\text{тс}} + Z_{\text{гб}} + Z_{\text{сп}} \quad (8)$$

Затраты в биометановую установку складываются из затрат на биогазовую установку и станцию очистки биогаза до состава биометана:

$$Z_{\text{бмг}} = Z_{\text{бгг}} + Z_{\text{со}}, \quad (9)$$

где $Z_{\text{бгг}}$ — затраты в биогазовую установку, руб.; $Z_{\text{со}}$ — затраты на станцию очистки, руб.

В качестве исходного субстрата наиболее эффективно использовать органические отходы сельскохозяйственных и мясоперерабатывающих предприятий [27]. Наиболее эффективная доставка субстрата от предприятий до биометановой установки осуществляется автомобильным транспортом в тягачах-цистернах [22]. Затраты на транспортировку субстрата $Z_{\text{тс}}$, руб., определяются расходом топлива, который зависит от объема субстрата и расстояния от источника их образования до биометановой установки:

$$Z_{\text{тс}} = c_{\text{т}} Q_{\text{т}}, \quad (10)$$

где $c_{\text{т}}$ — стоимость топлива, руб./л; $Q_{\text{т}}$ — расход топлива на доставку субстрата, л/км.

Затраты на газопровод для подачи биометана от биометановой установки до системы газораспределения рассчитываются суммарной длиной сети и стоимостью ее строительства:

$$Z_{\text{гб}} = l_{\text{гб}} K_{\text{гб}}^{\text{уд}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{гб}}$ — длина газопровода для подачи биометана, м; $K_{\text{гб}}^{\text{уд}}$ — затраты в строительство 1 м газопровода, руб./м.

Затраты на станцию подачи биометана в сети газораспределения зависят от производительности станции:

$$Z_{\text{сп}} = q_{\text{бгг}} 3827 (q_{\text{бгг}})^{-0,223}, \quad (12)$$

где $q_{\text{бгг}}$ — производительность биогазовой установки, м³/ч.

Критическая протяженность газопровода-отвода ($L_{\text{гб}}^{\text{кр}}$, км) может быть определена при равенстве приведенных затрат в рассматриваемые варианты систем газоснабжения $Z_{\text{пг}} = Z_{\text{бм}}$:

$$L_{\text{гб}}^{\text{кр}} = \frac{Z_{\text{бмг}} + Z_{\text{тс}} + Z_{\text{гб}} + Z_{\text{сп}} - Z_{\text{д+мг}} - Z_{\text{грс}}}{K_{\text{гб}}^{\text{уд}}}. \quad (13)$$

Используя выражения (1)–(13), после преобразований получим уравнение для определения критической протяженности газопровода-отвода:

$$0,02 \left[\frac{K_{\text{бгг}} + K_{\text{со}} + l_{\text{гб}} K_{\text{гб}}^{\text{уд}} + q_{\text{бгг}} 3827 (q_{\text{бгг}})^{-0,223} - 6 \cdot 10^8 \ln(Q_{\text{т}}) + 4 \cdot 10^7}{-6 \cdot 10^8 \ln(Q_{\text{т}}) + 4 \cdot 10^7} \right] + \frac{+(c_{\text{т}} Q_{\text{т}}) - (c_{\text{пг}} Q_{\text{г}})}{K_{\text{гб}}^{\text{уд}}}, \quad (14)$$

где $K_{\text{бгг}}$ — капитальные затраты на биогазовую установку, руб.; $K_{\text{со}}$ — капитальные затраты на станцию очистки, руб.; 0,02 — доля от капитальных затрат на эксплуатационные расходы с учетом коэффициента эффективности капитальных вложений, 1/год.

По значению критической протяженности газопровода-отвода можно установить целесообразность применяемых систем газоснабжения для населенных пунктов РФ. Если $L > L_{\text{гб}}^{\text{кр}}$, то целесообразна газификация биометаном. Если $L < L_{\text{гб}}^{\text{кр}}$, то рациональна газификация сетевым ПГ.

Выражения (1)–(14) представляют собой экономико-математическую модель выбора способа газоснабжения населенных пунктов: сетевым ПГ или биометаном. С помощью разработанной модели определим рациональную область применения систем газоснабжения биометаном в населенных пунктах Кировской области. Кировская область характеризуется относительно низким уровнем газификации ПГ — 41,9 %, при среднем уровне газификации по стране — 70,1 %. При этом в области достаточно развитая сельскохозяйственная отрасль экономики, а именно: животноводство, птицеводство и растениеводство. Вследствие этого, актуальным для Кировской области является получение и использование биометана для газоснабжения населенных пунктов.

В качестве начальных и граничных условий примем:

- плотность субстратообразования, $q_{\text{с}}$, т/км²:

$$50 \text{ т/км}^2 < q_{\text{с}} < 200 \text{ т/км}^2; \quad (15)$$

- протяженность газопровода-отвода должна быть в пределе:

$$0 < L_{\text{гб}} < L_{\text{гб}}^{\text{max}}, \quad (16)$$

где $L_{\text{гб}}^{\text{max}}$ — максимальная протяженность газопровода-отвода, принимается из реальной практики работы магистральных газопроводов, $L_{\text{гб}}^{\text{max}} = 250$ км;

- численность населения населенного пункта или муниципального округа N , чел.:

$$0 < N < 30 \text{ 000 чел.}; \quad (17)$$

- тип прокладки газопроводов-отводов — подземный из стальных газопроводов диаметром $d_{\text{гб}}$:

$$200 \text{ мм} < d_{\text{гб}} < 530 \text{ мм}. \quad (18)$$

В качестве допущения примем, что потребители газа и источники субстрата расположены на территории области равномерно.

В результате численной реализации экономико-математической модели определены технико-экономические параметры системы газоснабжения биометана для условий Кировской области. Произведен расчет для четырех условий местности по плотности субстратообразования (50, 100, 150, 20 т/км²) в зависимости от численности населения (1000, 5000, 10 000, 15 000, 20 000, 25 000, 30 000 чел.). Получены

значения критической протяженности газопровода-отвода, радиуса действия биометановой установки по субстрату, расхода биометана, длины газопровода для подачи биометана и приведенных затрат в систему газоснабжения (табл.).

Из табл. видно, что при увеличении численности населения критическая протяженность газопровода-отвода возрастает при всех значениях плотности субстратообразования. Так, для сельского поселения с численностью 1000 чел. критическая протяженность газопровода-отвода составляет 12,139–12,832 км, а при численности 5000 чел. —

24,820–28,044 км. Для поселка городского типа с населением 10 000 человек протяженность газопровода-отвода составляет 38,2–46,053 км, а при численности 15 000 человек — 50,923–64,677 км. Для городского поселения 25 000 чел. критическая протяженность газопровода-отвода составляет 76,441–105,182 км, а при численности 30 000 чел. — 89,617–127,279 км.

При увеличении плотности субстратообразования с 50 до 200 т/км² критическая протяженность газопровода-отвода уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении плотности субстратообразования радиус действия биометановой установки

Технико-экономические параметры системы газоснабжения биометана для условий Кировской области

Technical and economic parameters of the biomethane gas supply system for the conditions of the Kirov region

Численность населения, чел. Population, people	Критическая протяженность газопровода-отвода, км Critical length of the gas pipeline branch, km	Радиус действия биометановой установки по субстрату, км The radius of the biomethane plant on the substrate, km	Расход биометана, м ³ /ч Biomethane consumption, m ³ /h	Длина газопровода подачи биометана, км Biomethane supply gas pipeline length, km	Приведенные затраты в систему газоснабжения, руб./год The present value of the gas supply system, rubles/year
Плотность субстратообразования $q_c = 50$ т/км ² / Density of substrate formation $q_c = 50$ т/км ²					
1000	12,832	27,485	365,56	8,543	133 140 825
5000	28,044	46,065	1026,84	14,318	295 464 877
10 000	46,053	62,038	1862,43	19,283	491 057 451
15 000	64,677	74,808	2708,01	23,252	692 094 530
20 000	84,336	85,815	3563,58	26,674	902 035 003
25 000	105,182	95,671	4429,14	29,737	1 122 079 847
30 000	127,279	104,701	5304,69	32,544	1 352 747 328
Плотность субстратообразования $q_c = 100$ т/км ² / Density of substrate formation $q_c = 100$ т/км ²					
1000	12,443	19,435	365,56	8,938	130 031 156
5000	26,184	32,573	1026,84	14,980	280 584 691
10 000	41,491	43,868	1862,43	20,174	454 564 265
15 000	56,666	52,897	2708,01	24,327	628 013 154
20 000	72,235	60,680	3563,58	27,906	805 221 271
25 000	88,405	67,650	4429,14	31,111	987 864 270
30 000	105,282	74,035	5304,69	34,048	1 176 768 352
Плотность субстратообразования $q_c = 150$ т/км ² / Density of substrate formation $q_c = 150$ т/км ²					
1000	12,280	15,869	365,56	9,491	128 729 598
5000	25,376	26,596	1026,84	15,907	274 120 028
10 000	39,492	35,818	1862,43	21,423	438 568 901
15 000	53,144	43,190	2708,01	25,833	599 831 113
20 000	66,903	49,545	3563,58	29,634	762 568 725
25 000	81,006	55,236	4429,14	33,038	928 669 373
30 000	95,573	60,449	5304,69	36,156	1 099 096 575
Плотность субстратообразования $q_c = 200$ т/км ² / Density of substrate formation $q_c = 200$ т/км ²					
1000	12,139	13,743	365,56	8,062	127 600 132
5000	24,820	23,033	1026,84	13,512	269 673 720
10 000	38,200	31,019	1862,43	18,197	428 235 676
15 000	50,923	37,404	2708,01	21,943	582 068 915
20 000	63,587	42,908	3563,58	25,172	736 038 785
25 000	76,441	47,835	4429,14	28,063	892 151 440
30 000	89,617	52,350	5304,69	30,711	1 051 448 066

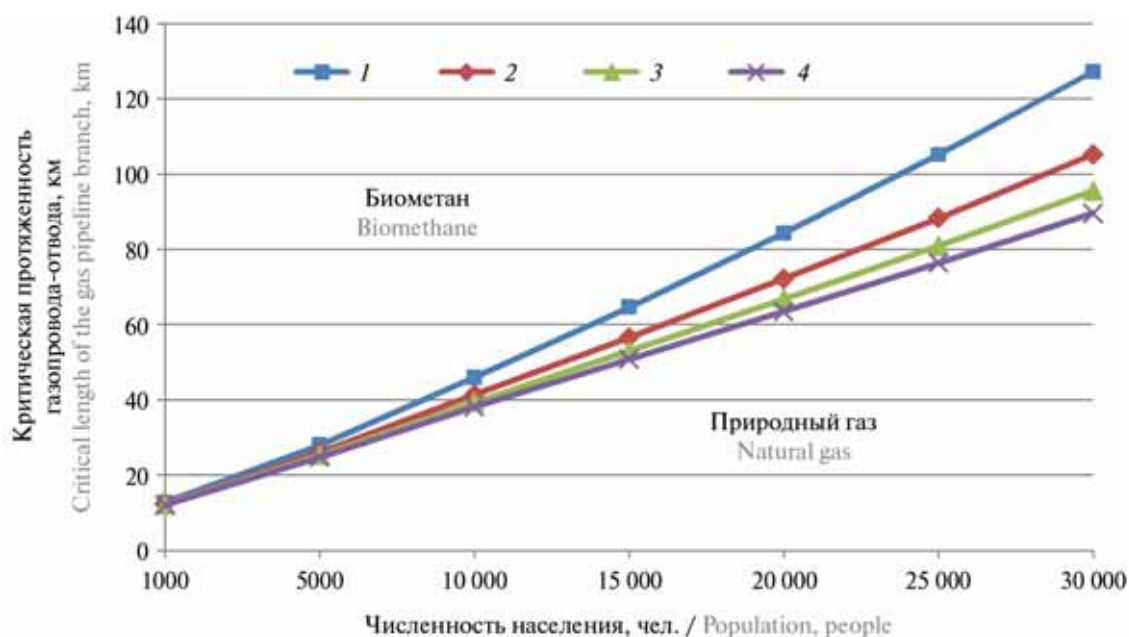


График зависимости критической протяженности газопровода-отвода от численности населения: 1 — $q_c = 50$ т/км²; 2 — $q_c = 100$ т/км²; 3 — $q_c = 150$ т/км²; 4 — $q_c = 200$ т/км²

Graph of the dependence of the critical length of the gas pipeline branch on the population size: 1 — $q_c = 50$ т/км²; 2 — $q_c = 100$ т/км²; 3 — $q_c = 150$ т/км²; 4 — $q_c = 200$ т/км²

по субстрату и приведенные затраты в системы газоснабжения биометаном снижаются. Тогда данные системы становятся более конкурентоспособными с системами газоснабжения ПГ даже на незначительном удалении населенного пункта от существующих систем газоснабжения.

На основе данных (табл.) построен график зависимости критической протяженности газопровода-отвода от численности населения населенного пункта или муниципального округа (рис.).

Для области графика, расположенной выше линии, целесообразным вариантом газоснабжения является применение биометана, а для области, расположенной ниже линии, — сетевым ПГ. Данный график позволяет определить наиболее рациональный способ газификации населенных пунктов в зависимости от плотности субстратообразования и плотности газопотребления газоснабжаемой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана экономико-математическая модель выбора способа газоснабжения населенных пунктов, удаленных от магистральных газопроводов, основанная на технико-экономическом сравнении двух вариантов газоснабжения: сетевым ПГ и биометаном. Модель позволяет определить рациональную область применения биометана для газификации населенного пункта или муниципального округа в зависимости от удаленности населенного пункта, объема исход-

ного субстрата, численности населения и объема газопотребления.

С помощью разработанной экономико-математической модели произведен расчет рациональной области применения биометана для газоснабжения населенных пунктов Кировской области. Выявлены технико-экономические параметры системы газоснабжения биометаном: критическая протяженность газопровода-отвода, радиус действия биометановой установки по субстрату, расход биометана, длина газопровода для подачи биометана и приведенные затраты в систему газоснабжения.

Получена графическая зависимость критической протяженности газопровода-отвода от численности населения при разных плотностях субстратообразования, которая дает возможность определить область рационального применения биометана для газификации населенных пунктов с населением от 1000 до 30 000 чел. Установлено, что для сельского поселения с численностью 1000 чел. критическая протяженность газопровода-отвода составляет 12,139–12,832 км, а при численности 5000 чел. — 24,820–28,044 км. Для поселка городского типа с населением 10 000 чел. протяженность газопровода-отвода — 38,2–46,053 км, а при численности 15 000 чел. — 50,923–64,677 км. Для городского поселения 25 000 чел. критическая протяженность газопровода-отвода составляет 76,441–105,182 км, а при численности 30 000 чел. — 89,617–127,279 км.

Полученные результаты позволяют определить область рационального применения альтернативного источника энергии — биометана и могут быть реко-

мендованы для разработки и проектирования систем газоснабжения населенных пунктов РФ, отдаленных от существующих магистральных газопроводов. Можно сделать вывод, что применение биометана для

газоснабжения населенных пунктов в развитых сельскохозяйственных регионах дает возможность повысить эффективность системы газоснабжения и надежность всей газотранспортной системы страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Savickis J., Zemite L., Zeltins N., Bode I., Jansons L., Dzelzitis E. et al. The biomethane injection into the natural gas networks: The EU's gas synergy path // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57. Issue 4. Pp. 34–50. DOI: 10.2478/lpts-2020-0020
2. Miltner M., Makaruk A., Harasek M. Application of gas permeation for biogas upgrade — Operational experiences of feeding biomethane into the Austrian gas grid // *Proceedings of 16th European Biomass Conference & Exhibition*. 2008.
3. Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б. Перспективы производства и использования биометана в Украине // *Аналитическая записка БАУ*. 2014. № 11. 44 с.
4. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006
5. Repele M., Ramanis M., Bazbauers G. Biomethane supply support policy: system dynamics approach // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 95. Pp. 393–400. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.044
6. Suslov D.Y. Application of biomethane for gas supply within the settlements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1066. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012004
7. Repele M., Udrene L., Bazbauers G. Support mechanisms for biomethane production and supply // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 113. Pp. 304–310. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.04.070
8. Wall D.M., Dumont M., Murphy J.D. Green Gas: Facilitating a future green gas grid through the production of renewable gas // *IEA Bioenergy: Task 37*. 2018.
9. Медведева О.Н. Техничко-экономический анализ вариантов газоснабжения потребителей // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 4. С. 121–126.
10. Медведева О.Н., Фролов В.О. Техничко-экономический анализ вариантов снабжения потребителей сжиженным природным газом // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*. 2011. № 3 (23). С. 49–55.
11. Осипова Н.Н. Выбор рациональной области применения систем газоснабжения при газификации населенных пунктов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2012. № 29 (48). С. 167–173.
12. Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Родионов Ю.В., Тараканов О.В. Оптимизация систем газоснабжения населенных пунктов на основе газоздушных смесей // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 3 (44). С. 108–114.
13. Hoo P.Y., Patrizio P., Leduc S., Hashim H., Kraxner F., Tan S.T. et al. Optimal biomethane injection into natural gas grid — biogas from Palm Oil Mill Effluent (POME) in Malaysia // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. Pp. 562–569. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.357
14. Paturska A., Repele M., Bazbauers G. Economic assessment of biomethane supply system based on natural gas infrastructure // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 72. Pp. 71–78. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.011
15. Gil-Carrera L., Browne J.D., Kilgallon I., Murphy J.D. Feasibility study of an off-grid biomethane mobile solution for agri-waste // *Applied Energy*. 2019. Vol. 239. Pp. 471–481. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.141
16. O'Shea R., Wall D.M., Kilgallon I., Browne J.D., Murphy J.D. Assessing the total theoretical, and financially viable, resource of biomethane for injection to a natural gas network in a region // *Applied Energy*. 2017. Vol. 188. Pp. 237–256. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.121
17. Fubara T., Cecelja F., Yang A. Techno-economic assessment of natural gas displacement potential of biomethane: A case study on domestic energy supply in the UK // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 131. Pp. 193–213. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.022
18. Chinnici G., Selvaggi R., D'Amico M., Pecorino B. Assessment of the potential energy supply and biomethane from the anaerobic digestion of agro-food feedstocks in Sicily // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. Pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.018
19. Suwansri S., Moran J.C., Aggarangsi P., Tipayawong N., Bunkham A., Rerkkriangkrai P. A biomethane solution for domestic cooking in Thailand // *Energy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 23. Pp. 68–77. DOI: 10.1016/j.esd.2014.08.003
20. Rotunno P., Lanzini A., Leone P. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 102. Pp. 417–432. DOI: 10.1016/j.renene.2016.10.062

21. Cucchiella F., D'Adamo I. Technical and economic analysis of biomethane: A focus on the role of subsidies // *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 119. Pp. 338–351. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.058

22. Cucchiella F., D'Adamo I., Gastaldi M. Profitability analysis for biomethane: a strategic role in the Italian transport sector // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2015. Vol. 5 (2). Pp. 440–449.

23. Budzianowski W.M., Brodacka M. Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 141. Pp. 254–273. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.071

24. Ионин А.А. Газоснабжение : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1989. 439 с.

25. Bauer F., Hulteberg C., Tamm D. Biogas upgrading — Review of commercial technologies // *Svenskt Gastekniskt Center AB, Malmö*. 2013. 84 p.

26. Urban W., Girod K., Lohmann H. Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008 // *Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen*. 2009. 123 p.

27. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of obtaining biogas from waste of meat processing enterprises // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012029

Поступила в редакцию 13 августа 2021 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Денис Юрьевич Суслов** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 653617, ResearcherID: Q-6003-2017, ORCID: 0000-0001-7348-8674, Scopus: 36524018300; suslov1687@mail.

REFERENCES

1. Savickis J., Zemite L., Zeltins N., Bode I., Jansons L., Dzelzitis E. et al. The Biomethane Injection into the Natural Gas Networks: The EU's Gas Synergy Path. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020; 57(4):34-50. DOI: 10.2478/lpts-2020-0020

2. Miltner M., Makaruk A., Harasek M. Application of gas permeation for biogas upgrade — Operational experiences of feeding biomethane into the Austrian gas grid. *Proceedings of 16th European Biomass Conference & Exhibition*. 2008.

3. Geletukha G.G., Kucheruk P.P., Matveev Yu.B. Prospects for the production and use of biomethane in Ukraine. *Analytical note of BAU*. 2014; 11:44. (rus.).

4. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018; 129:457-472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006

5. Repele M., Ramanis M., Bazbauers G. Biomethane Supply Support Policy: System Dynamics Approach. *Energy Procedia*. 2016; 95:393-400. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.044

6. Suslov D.Y. Application of Biomethane for Gas Supply Within the Settlements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1066:012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012004

7. Repele M., Udrene L., Bazbauers G. Support Mechanisms for Biomethane Production and Supply.

Energy Procedia. 2017; 113:304-310. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.04.070

8. Wall D.M., Dumont M., Murphy J.D. Green Gas: Facilitating a future green gas grid through the production of renewable gas. *IEA Bioenergy: Task 37*. 2018.

9. Medvedeva O.N. Technical and economic analysis of gas supply options for consumers. *Fundamental Research*. 2011; 4:121-126. (rus.).

10. Medvedeva O.N., Frolov V.O. The selection of gas pipeline route on the plan of gas supplied area. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2011; 3(23):49-55. (rus.).

11. Osipova N.N. Choice of rational application field of gas supply systems when providing gas supply to settlements. *Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University. Series: Building and architecture*. 2012; 29(48):167-173. (rus.).

12. Osipova N.N., Grishin B.M., Rodionov Yu.V., Tarakanov O.V. Optimization of gas supply systems based on air-gas mixtures of inhabited localities. *Regional Architecture and Construction*. 2020; 3(44):108-114. (rus.).

13. Hoo P.Y., Patrizio P., Leduc S., Hashim H., Kraxner F., Tan S.T., et al. Optimal Biomethane Injection into Natural Gas Grid – Biogas from Palm Oil Mill Effluent (POME) in Malaysia. *Energy Procedia*. 2017; 105:562-569. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.357

14. Paturska A., Repele M., Bazbauers G. Economic assessment of biomethane supply system based on natural gas infrastructure. *Energy Procedia*. 2015; 72:71-78. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.011
15. Gil-Carrera L., Browne J.D., Kilgallon I., Murphy J.D. Feasibility study of an off-grid biomethane mobile solution for agri-waste. *Applied Energy*. 2019; 239:471-481. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.141
16. O'Shea R., Wall D.M., Kilgallon I., Browne J.D., Murphy J.D. Assessing the total theoretical, and financially viable, resource of biomethane for injection to a natural gas network in a region. *Applied Energy*. 2017; 188:237-256. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.121
17. Fubara T., Cecelja F., Yang A. Techno-economic assessment of natural gas displacement potential of biomethane: A case study on domestic energy supply in the UK. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018; 131:193-213. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.022
18. Chinnici G., Selvaggi R., D'Amico M., Pecorino B. Assessment of the potential energy supply and biomethane from the anaerobic digestion of agro-food feedstocks in Sicily. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 82:6-13. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.018
19. Suwansri S., Moran J.C., Aggarangsi P., Tip-payawong N., Bunkham A., Rerkkriangkrai P. A biomethane solution for domestic cooking in Thailand. *Energy for Sustainable Development*. 2014; 23:68-77. DOI: 10.1016/j.esd.2014.08.003
20. Rotunno P., Lanzini A., Leone P. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable Energy*. 2017; 102:417-432. DOI: 10.1016/j.renene.2016.10.062
21. Cucchiella F., D'Adamo I. Technical and economic analysis of biomethane: A focus on the role of subsidies. *Energy Conversion and Management*. 2016; 119:338-351. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.058
22. Cucchiella F., D'Adamo I., Gastaldi M. Profitability Analysis for Biomethane: A Strategic Role in the Italian Transport Sector. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2015; 5(2):440-449.
23. Budzianowski W.M., Brodacka M. Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability. *Energy Conversion and Management*. 2017; 141:254-273. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.071
24. Ionin A.A. *Gas supply: textbook for universities. 4th ed., Rev. and add.* Moscow, Stroyizdat, 1989; 439. (rus.).
25. Bauer F., Hulteberg C., Tamm D. Biogas upgrading — Review of commercial technologies. *Svenskt Gastekniskt Center AB, Malmö*. 2013; 84.
26. Urban W., Girod K., Lohmann H. Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008. *Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen*. 2009; 123.
27. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of obtaining biogas from waste of meat processing enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 945:012029. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012029

Received August 13, 2021.

Adopted in revised form on August 13, 2021.

Approved for publication on October 4, 2021.

BIONOTES: Denis Yu. Suslov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov); 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RISC: 653617, ResearcherID: Q-6003-2017, ORCID: 0000-0001-7348-8674, Scopus: 36524018300; suslov1687@mail.

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:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список 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.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список 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 ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список 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

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. рекомендации по составлению аннотации.

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке 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.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемова С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

