

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 1/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 1
2021**

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

Сквозной номер 148

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 1
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:	vestnikmgsu@mgsu.ru , 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	27.01.2021.
Подписан в свет	29.01.2021.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 13,40. Тираж 100 экз. Заказ № 4	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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: *Александр Дмитриевич Федотов*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

Александр Николаевич Власов, д-р техн. наук, 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 высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

Евгений Иванович 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:	29.01.2021

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

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:** *Aleksandr D. Fedotov*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

М.А. Слепнев, А.С. Аль-катрани

Влияние нефтяных территорий на развитие иракских мухаз на примере г. Басра. 12

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

В.С. Широков, В.Ю. Алтатов, Е.А. Гордеев

Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий 20

С.Б. Языев, А.С. Чепурненко, А.А. Аваков

Численно-аналитический расчет продольного изгиба призматических упругих стержней при действии осевой сжимающей нагрузки с учетом собственного веса 30

В.А. Митрошин, В.Л. Мондрус

Учет ударного воздействия при движении поездов метрополитена в расчете компонентов напряженно-деформированного состояния на контуре тоннельной обделки 41

С.Ю. Савин

Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига. 49

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Е.Н. Покровская

Разработка наномодифицированных полифункциональных защитных систем для деревянных конструкций 59

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.Н. Коханенко, М.С. Александрова, А.И. Кондратенко

Модель процесса свободного растекания двухмерного в плане водного потока за безнапорными отверстиями 67

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Е.А. Гридасова, М.А. Середя, Ш.Ш. Закиров угли

Исследование влияния высокочастотного циклического нагружения на структуру и свойства сварных соединений технологических трубопроводов 75

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.З. Величкин, М.В. Петроченко, К.И. Стрелец, Е.Б. Заводнова, А.Ю. Городишенина

Метод ветвей и границ при организации квартальной застройки. 91

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

В.И. Андреев

Рецензия на учебное пособие «Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью» (2020 г.) 105

Требования к оформлению научной статьи 106

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Mihail A. Slepnev, Anwar Sabeeh Al-qatrany

Basra: the influence of territories, rich for crude oil, on the development of Iraqi governorates 12

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

Viacheslav S. Shirokov, Vadim Yu. Alpatov, Evgeniy A. Gordeyev

Research into the stiffness of beam-column joints of modular prefabricated buildings. 20

Serdar B. Yazyev, Anton S. Chepurenko, Arthur A. Avakov

Numerical and analytical calculation of the buckling of elastic prismatic rods under the action of axial compressive loading with account for the dead load 30

Vasily A. Mitroshin, Vladimir L. Mondrus

The impact effect of underground trains in motion analyzed together with other factors contributing to the stress-strain state arising along the tunnel lining boundary 41

Sergey Yu. Savin

Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special impacts with account taken of shear deformations 49

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Elena N. Pokrovskaya

Development of nanomodified multifunctional protection systems for wood structures 59

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Victor N. Kokhanenko, Mariya S. Aleksandrova, Anatolij I. Kondratenko

Simulation of the process of free spreading of a two-dimensional water flow behind pressure-free holes 67

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Ekaterina A. Gridasova, Maria A. Sereda, Shokhrukh S. Zakirov ugli

A study of the influence of high frequency cyclic loading on the structure and properties of weld connections in process pipelines 75

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION.

Victor Z. Velichkin, Marina V. Petrochenko, Ksenia I. Strelets, Evgeniya B. Zavodnova, Anna Yu. Gorodishenina

The branch and bound method applied to the construction of residential quarters. 91

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

V.I. Andreev

The review of the “Soil mechanics for high-rise buildings having sophisticated underground substructures” (2020) study guide 105

Requirements for research paper design 106

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 1, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16, Issue 1, 2021

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).

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Конкурс на лучшую обзорную статью

The best review article contest



Уважаемые читатели, как вы уже знаете, осенью 2021 г. НИУ МГСУ отмечает свой столетний юбилей, а наш журнал — пятидесятилетний. Кроме того, 2021 год в Российской Федерации объявлен Годом науки и технологий.

Невозможно не поддержать столь знаковые события, и мы приняли решение провести конкурс на лучшую обзорную статью. Сообщаем о старте конкурса. Участие в конкурсе бесплатное.

Рукописи статей и сопроводительные материалы принимаются с 1 февраля до 30 апреля 2021 г., присылайте их на e-mail: journals@mgsu.ru.

К конкурсу допускаются обзорные статьи, подготовленные авторами, осуществляющими оригинальные научные исследования в области строительства и архитектуры, учитывающие мировой опыт. Объем статьи от 40 до 100 тыс. знаков со списком литературы легитимных научных российских и зарубежных публикаций — **не менее 80 позиций**.

Все рукописи, оформленные в соответствии с требованиями, а также прошедшие рецензирование, будут бесплатно опубликованы в журнале, входящем в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Тематика конкурсных статей:

- 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, «зеленой» среды жизнедеятельности;
- Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство;
- Инженерные системы в строительстве;
- Технология и организация строительства. Экономика и управление в строительстве.

Приглашаем авторов из образовательных организаций высшего образования, научно-исследовательских и академических институтов, других организаций, ориентированных на сферы профессиональной деятельности в строительной отрасли, принять участие в конкурсе.

Подробнее о конкурсе можно узнать на сайте <http://vestnikmgsu.ru/>, на котором размещена конкурсная документация.

*Главный редактор В.И. Теличенко,
почетный президент НИУ МГСУ,
доктор технических наук, профессор, академик РААСН*

*Editor-in-Chief Valery I. Telichenko,
Academician, Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

Влияние нефтяных территорий на развитие иракских мухафаз на примере г. Басра

М.А. Слепнев, А.С. Аль-катрани

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты анализа изменения планировочной структуры урбанизированной территории на примере г. Басра, использование территорий для нефтяных добыч мухафазы Басра и их влияние на развитие города и окружающую среду, которое ведет к уменьшению площади природных территорий, практический аспект научных исследований. Развитие информационной системы градостроительной деятельности и ведение баз данных, направленных на изучение градостроительных задач для обеспечения сбалансированного развития территорий нефтедобычи мухафазы Басра при структурированной схеме регионального планирования — одна из важнейших задач Ирака. Увеличение площади жилых территорий, площадей нефтяных и промышленных зон в период начиная с 2003 г. — проблема, которая требует особого внимания. Создание экологического дисбаланса в результате значительного изменения видов использования территорий ведет к различным нарушениям и является серьезной градостроительской проблемой, стоящей перед провинцией Басра.

Материалы и методы. Используются официальные данные, предоставленные администрацией г. Басра; таблицы, документы и картографические материалы; информация из открытых источников — карты со статистическими расчетами программного комплекса ArcGIS 10.x и Microsoft Excel; метод ретроспективного анализа территории г. Басра с применением метода дистанционного зондирования, который позволил определить границы города и пространственную трансформацию.

Результаты. На основе проведенного ретроспективного анализа выявлено, что границы города трансформируются. Высокий экономический рост за счет нефтедобычи и развития промышленных территорий вызывает потребность в сбалансированных территориях, направленных на устойчивое развитие, особенно в исторической части г. Басра, которая испытывает деградацию.

Выводы. Проблема дисбаланса использования урбанизированных территорий и экологической устойчивости городов, пострадавших от военных действий, требует при разработке схем территориального планирования специальных регламентов, направленных на специальные действия по формированию границ города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивое развитие, территориальное планирование, дистанционное зондирование, ГИС-технологии, природные территории, нефтяные территории, мухафаза Басра

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слепнев М.А., Аль-катрани А.С. Влияние нефтяных территорий на развитие иракских мухафаз на примере г. Басра // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 12–19. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.12-19

Basra: the influence of territories, rich for crude oil, on the development of Iraqi governorates

Mihail A. Slepnev, Anwar Sabeeh Al-qatran

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

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of the analysis of changes in the planning structure of an urbanized area, addresses land use for crude oil recovery purposes in the Basra governorate, and explores the influence, produced by this activity on urban development and the environment using the city of Basra as an example. Crude oil recovery reduces the size of natural areas. The practical aspect of the scientific research entails the development of an information system designated for land management and the maintenance of databases focused on the study of urban planning tasks to ensure well-balanced development of areas, rich for crude oil in the Basra governorate with regard for a structured regional planning pattern as one of the most important objectives of Iraq. Growing residential areas, on the one hand, and expanding areas occupied by oil recovery and industrial enterprises, on the other hand, have been a relevant post-war problem since 2003. The environmental disorder, caused by substantial changes in land use, involves various disruptions, which translate into grave problems of the urban environment experienced by the governorate of Basra.

Materials and methods. Official data, submitted by the Basra administration, tables, documents and cartographic materials were used to perform this research, let alone the open source information, including maps that contain statistical calculations made using the ArcGIS10.x software package and Microsoft Excel. The co-authors also performed a retrospective analysis of the Basra territory using remote sensing, which allowed them to determine the boundaries of the city and to track its spatial transformation.

Results. The retrospective analysis has identified changes in the city borders. High economic growth, boosted by oil production and developing industrial territories, drives the need for well-balanced territories focused on sustainable development, especially in the historical part of Basra which is suffering from degradation.

Conclusions. The problem of unbalanced use of urbanized territories and environmental sustainability of cities, affected by wars and military operations, requires the development of regulations governing the delimitation of borders within the framework of a land-use plan to be developed.

KEYWORDS: sustainable development, land use planning, remote sensing, GIS technologies, natural territories, oil-rich areas, Basra Governorate

FOR CITATION: Slepnev M.A., Al-qatrany A.S. Basra: the influence of territories, rich for crude oil, on the development of Iraqi governorates. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):12-19. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.12-19 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху развития цифровой градостроительной системы Республики Ирак сфера нефтяной промышленности — одно из ведущих направлений экономического развития города. Экономическая блокада и война против Ирака привели к ухудшению качества жизни населения, разрушены городские территории, дороги, исторические и культурные памятники [1, 2]. Нефтяная деятельность оказывает большое влияние на взаимосвязь планирования различных систем, таких как инженерные сети, транспорт, сельское хозяйство, и диктует необходимость разработки программного планирования новых сельских населенных пунктов, отвечающих концепции устойчивого развития города. Басра — третий по величине город в Республике Ирак, главный порт страны, расположенный в провинции (мухафаза) на юге Ирака, на границе с Кувейтом и Саудовской Аравией и Ираном на востоке. Также граничит с провинциями Ди-Кар и Майсан на севере, и Мутанна на западе [3–5]. Общая площадь Басры составляет более 19 тысяч квадратных километров. Экономика страны на 80 % зависит от добычи нефти. Административное устройство мухафазы определено законодательством Республики Ирак, согласно которому вся территория разделена на 18 мухафаз. Каждая мухафаза разбита на округа и районы. Мухафаза Басры включает 7 округов и более 15 районов. Реконструкция городов с целью создания комфортной жизни для населения остается главной задачей республики, для ее решения иракское правительство целенаправленно применяет геоинформационные системы (ГИС) и технологии дистанционного зондирования [6–8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы официальные данные, предоставленные администрацией г. Басра; таблицы, документы и картографические материалы; информация из открытых источников — карты со статистическими расчетами программного комплекса ArcGIS 10.x и Microsoft Excel; метод ретроспективного анализа территории г. Басра с применением метода дистанционного зондирования, который позволил выявить границы города и пространственную трансформацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение структурированной схемы территориального планирования в зависимости от процессов, протекающих в социально-природно-технологической системе, — задача, которая должна включать социальную, экономическую, антропогенную и природную подсистемы. На территории мухафазы г. Басра размещены крупнейшие месторождения, занимающие большую площадь, на которых ведется активная разработка нефти и газа. Неконтролируемая добыча, негативные последствия разработки полезных ископаемых приводят к глобальным изменениям градоэкологической ситуации и нарушению устойчивого развития урбанизированных территорий. В провинции г. Басра имеется 18 нефтяных крупнейших месторождений с текущей добычей нефти более 1,9 млн баррелей, дополнительно проводятся добыча газа и развитие энергообеспечения страны для жизнеспособности производственных предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых. Развивать энергетический сектор согласованным, устойчивым и экологически чистым образом для удовлетворения местных потребностей и содействия росту растущей национальной экономики не представляется возможным в большинстве случаев из-за отсутствия разработанных методических материалов и регламентов, направленных на сохранение и поддержание градоэкологической безопасности страны [9–12].

Повышение уровня жизни граждан, создание рабочих мест и позиционирование Ирака как ключевого игрока на региональных и международных энергетических рынках — одно из важнейших направлений. Правительство уделяет большое внимание разработке структурного плана развития нефтяного сектора в мухафазе Басра с применением ГИС, представление информации может быть в виде цифровой карты, разработанной с использованием программного обеспечения ArcGIS (рис. 1). Мухафаза Басра включает в себя округа: Щат аль-Араб, Фао, Або аль-Касиб, Аль-Мадина, Курна, Зубира.

Население мухафазы Басра растет, начиная с 1934 г. ожидаемое увеличение численности на-

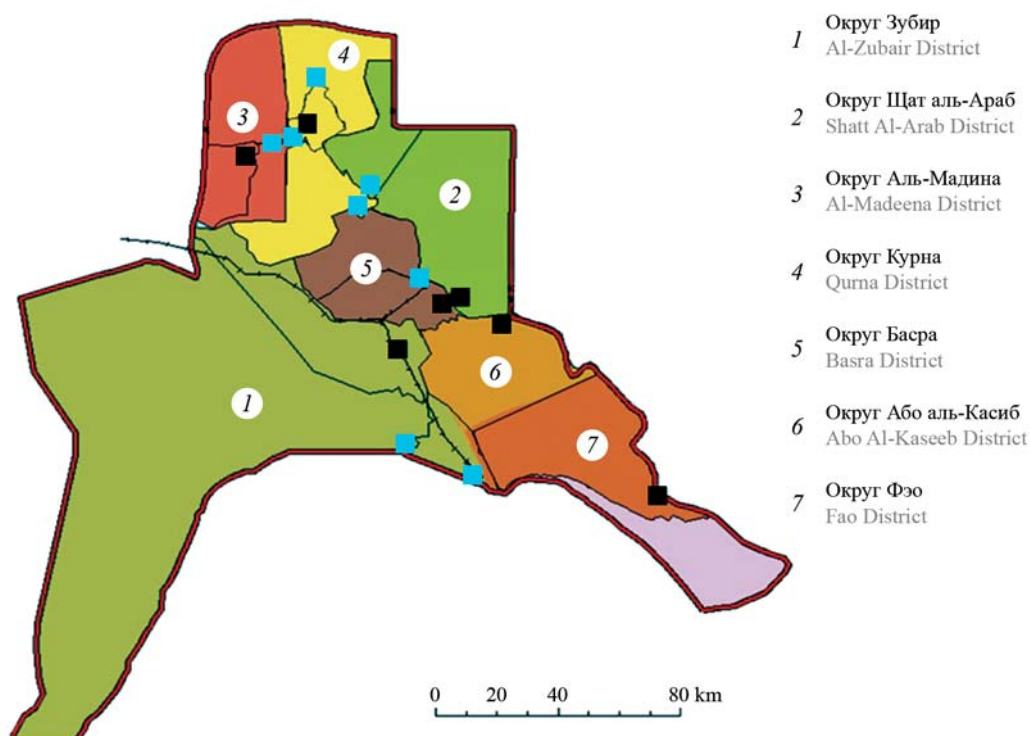


Рис. 1. Карта округов мухафазы Басра: ■ — район центра; ■ — округа центра; — граница города

Fig. 1. The district map of the Basra Governorate: ■ — a community in the city centre; ■ — districts in the city centre; — the city border

селения к 2023 г. достигнет проектного значения около 3 млн чел., к 2033 г. предполагаемая численность составит более 5 млн чел. В провинцию Басра приезжает большое количество туристов, основное место приложения труда постоянного населения сконцентрировано в историческом центре города [7, 9, 10]. Как показывает сравнительный анализ статистических данных, отмечается значительный рост численности населения (рис. 2, 3), и этот рост требует увеличения площади территорий населенных мест, поэтому роль городского планирования для решения этой проблемы в достижении устойчивой среды направлена на сохранение территорий,

находящихся в зоне доступности от нефтяных территорий иракских мухафаз.

Природные ресурсы Ирака, такие как нефть и газ, являются наиболее важными источниками экономического процветания и инвестиций при восстановлении и реконструкции в послевоенное время. Нефтяные территории составляют самую большую долю провинции Басра. Последствия добычи нефти — это воздействие на землю, которое оказывает влияние на окружающую среду и человека [11, 12], поэтому необходимо осуществлять работу по планированию экологического каркаса и формированию баланса территорий. Проведенные иссле-

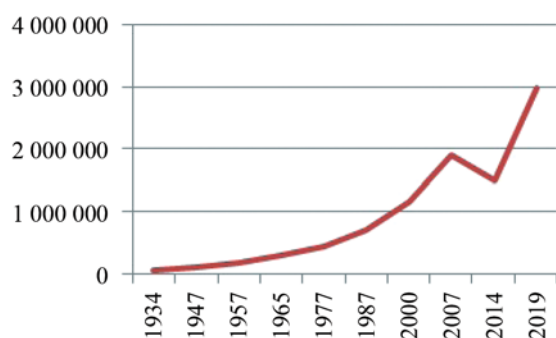


Рис. 2. Население мухафазы Басра 1934–2019 гг.:

— население

Fig. 2. Population of the Basra governorate in 1934–2019:

— population

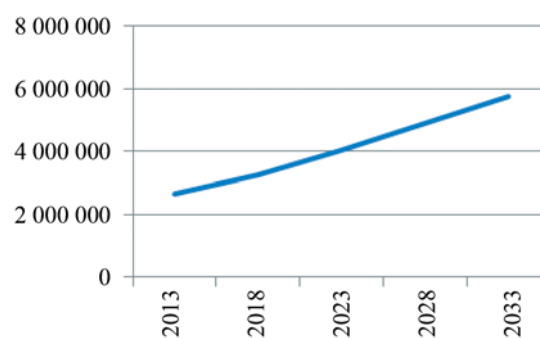


Рис. 3. Население мухафазы Басра 2013–2033 гг.:

— население

Fig. 3. Population of the Basra governorate in 2013–2033:

— population

дования по нефтедобыче за период до 2003 г. показали увеличение нефтяных участков и расширение радиуса нефтяных открытий, где работают многие международные компании, такие как Лукойл (Россия), BP (Великобритания), Shell (Нидерланды).

В работе были проанализированы данные структурного плана нефтяного сектора, подготовленного на 2013 г., анализ позволил выявить основные нефтяные участки в крае с различными обозначениями, которые указаны для следующих нефтяных месторождений: Северная Румайла, Макнон, Нахр Бин Умар, Западная Курна, Южная Румайла, Зубир и Лухис [13]. Добыча нефти составляет 650 000 баррелей в сутки. На рис. 4 показан суточный процент добычи нефти от объема производства баррелей в сутки на некоторых нефтяных месторождениях в провинции Басра. Данные нефтяные месторождения характеризуются увеличением нефтедобычи национальными отечественными и международными компаниями, на некоторых нефтедобывающих участках добыча составляет примерно 1 790 000 баррелей в сутки, что свидетельствует об увеличении суточной добычи нефти на месторождениях.

Развитие территорий нефтедобычи приведет к увеличению площади земель, инвестируемых для производства, и увеличению количества нефтяных скважин. Использование территорий не по назначению влечет изменение структуры землепользования и градостроительный дисбаланс [14–16]. Проведенные исследования выявили изменения в использовании территорий провинции. На рис. 5 приведена иллюстрация увеличения площади жилых зон за период с 1990 по 2003 гг., а также уменьшение природных территорий.

На рис. 6 показана трансформация землепользования на период 2013 г., как видно, произошло значительное изменение, связанное с жилыми территориями, промышленными и рекреационными зонами.

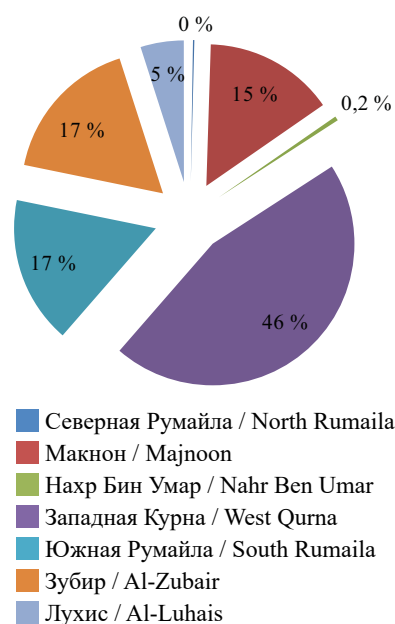


Рис. 4. Объем производства (баррелей в сутки) до 2003 г.

Fig. 4. Crude oil recovery (barrels a day) before 2003

Изменение структуры землепользования влияет на сельскохозяйственные и природные территории, а также подземные и поверхностные воды [17–19]. Трансформация площадей жилой зоны и расширение производственных и нефтяных территорий приводит к перекрытию зон, что увеличивает риск заболеваний и негативных последствий, побуждая государство задуматься о поиске новых планировочных решений, направленных на сохранение устойчивой городской среды [20, 21]. В работе предлагается расширять такие территории вертикально по плоскости (рис. 7), несмотря на то, что данное предложение не было социально принято в провинции Басра ранее из-за ограничения экспансии структуры нефтяных месторождений на юге Ирака.

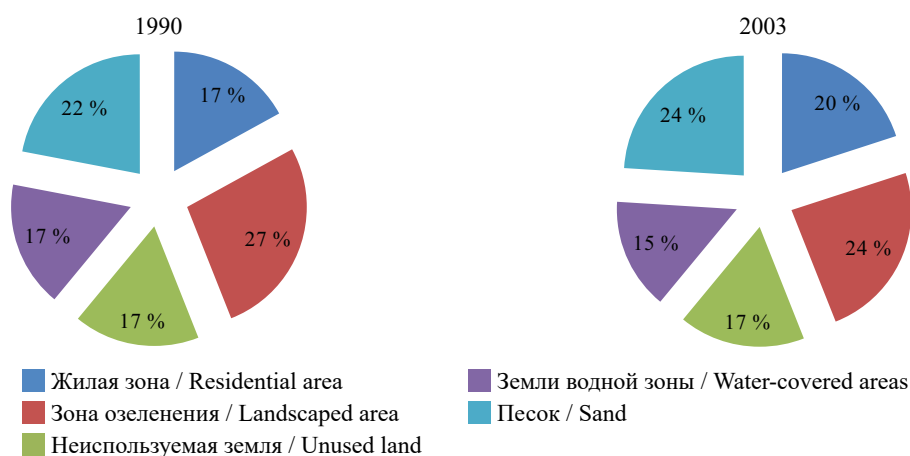
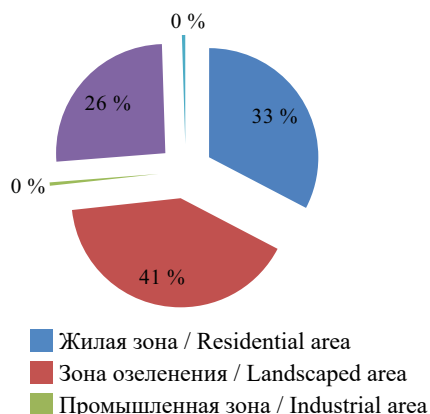


Рис. 5. Изменение землепользования в период с 1990 по 2003 гг.

Fig. 5. Land use changes between 1990 and 2003

До войны 2013 г. / Before the war of 2013



После войны 2013 г. / After the war of 2013

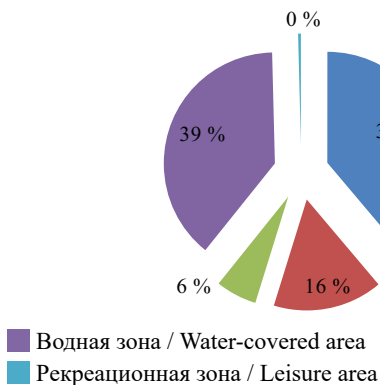


Рис. 6. Изменение землепользования до и после войны

Fig. 6. Land use before and after the war

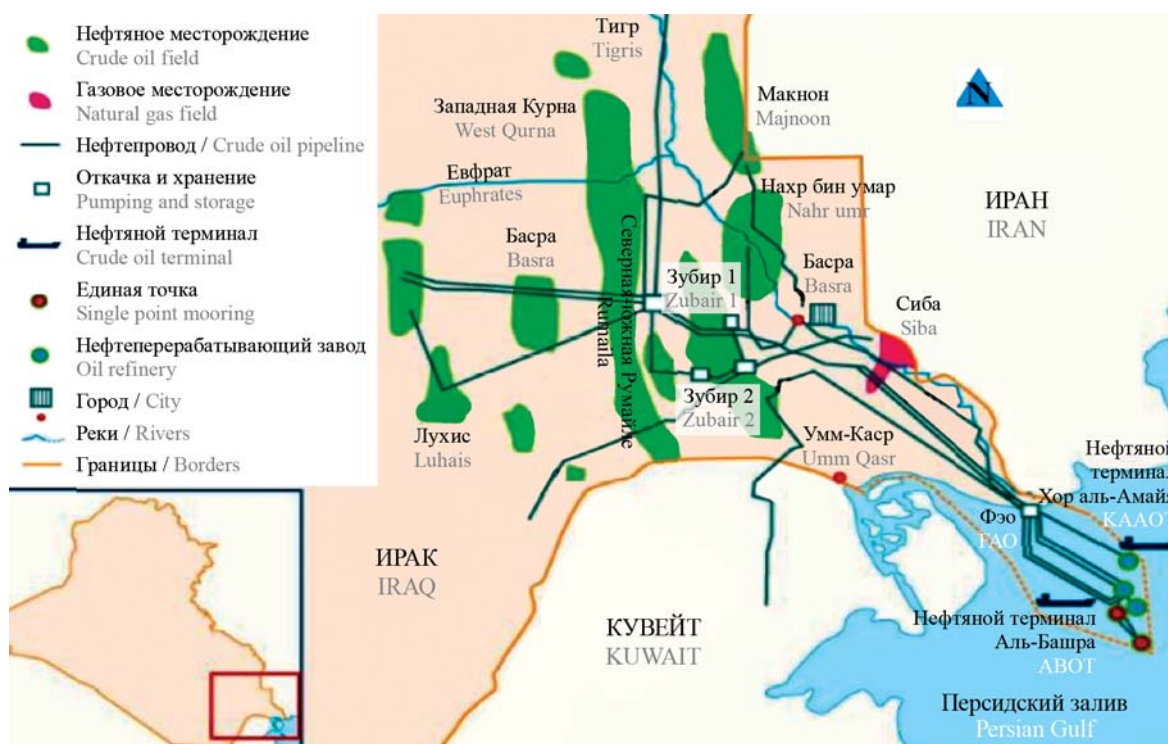


Рис. 7. Структура нефтяных месторождений на юге Ирака

Fig. 7. The structure of oil fields in the South of Iraq

На рис. 8 показаны границы жилых территорий и промышленных нефтяных участков в структуре мухафазы Басра с зонами конвергенции для нефтяного сектора и ожидаемые изменения к 2033 г., где увеличение застройки городских центров пересекается с промышленными территориями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие нефтяной промышленности в нефтедобывающих городах является одним из приоритетных направлений, на которое необходимо обратить

внимание. Неконтролируемый процесс захвата территорий нефтедобычи приводит к проблемам сохранения градоэкологического каркаса. Политические разногласия, отсутствие правовых механизмов решения градостроительных задач препятствуют концепции устойчивого развития города. Территории республики используются в интересах нефтедобычи, частных инвесторов и получения прибыли за счет реализации полезных ископаемых. Государственный мониторинг воздействия на окружающую среду, а также мероприятия, направленные на восстановление бывших территорий нефтедобычи, не прово-

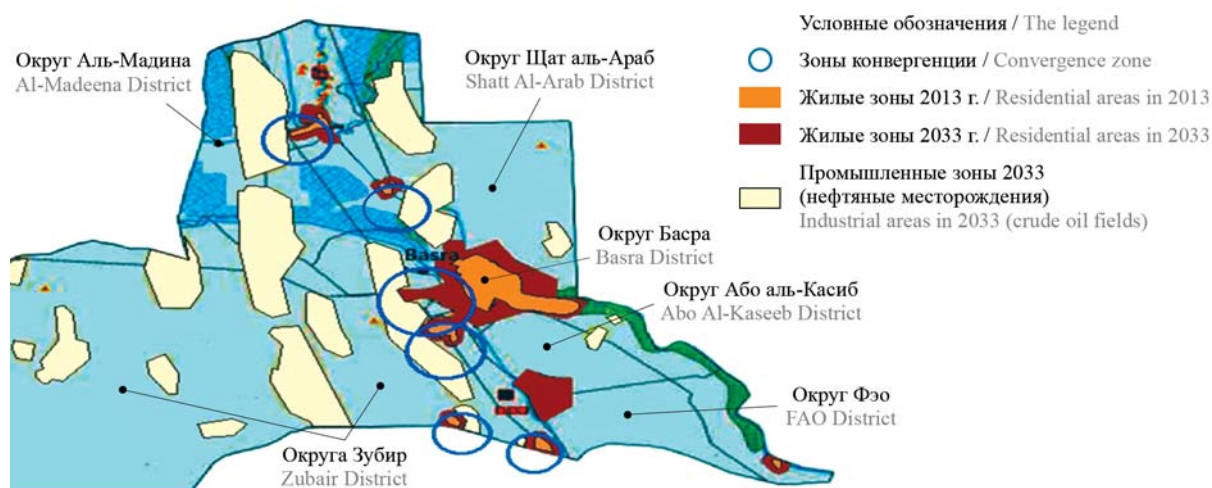


Рис. 8. Карта планирования на 2033 г.

Fig. 8. Land use planning map for the year 2033

дятся. Применение основных градостроительных приемов в провинции Басра — актуальная задача, решение которой возможно при выполнении ряда условий, ориентированных на увеличение зеленых насаждений промышленных зон, построение поясов за пределами границ каждого нефтяного месторож-

дения. При функционировании градостроительной системы учета земель необходимо определять структуру, разработать систему учета, определять состав базы данных ГИС, разрабатывать градоэкологические карты на основе мониторинга и дистанционного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов. М. : Архитектура-С, 2010. 183 с.
2. Курбатова А.С. Ландшафтно-экологический анализ формирования градостроительных структур. М. ; Смоленск : Манджента, 2004. 400 с.
3. Hadeel A., Jabbar M., Chen X. Application of remote sensing and GIS to the study of land use/cover change and urbanization expansion in Basrah province, southern Iraq // *Geo-spatial Information Science*. 2009. Vol. 12. Issue 2. Pp. 135–141. DOI: 10.1007/s11806-009-0244-7
4. Mohammed H.S., Muafaq F.A., Abdullah A.A. The standard model of oil characteristics of Zubair reservoir in Luhais field southern Iraq — 2019 // *Bio-chemical and Cellular Archives*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 1849–1855.
5. Tosland B. Planning southern Iraq: placing the progressive theories of Max Lock in Um Qasr, Margil, and Basra in the context of Iraqi national development, 1954–1956 // *Planning Perspectives*. 2019. Vol. 34. Issue 6. Pp. 1023–1044. DOI: 10.1080/02665433.2018.1468806
6. Slepnev M., Sherbena E., Al-qatrany A.C.D. The use of smart remote sensing technologies in the development of master plans of cities on the example of the city of Basra // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 022013. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022013
7. Щербина Е.В. Развитие системы градостроительных регламентов для обеспечения устойчивого развития территорий // *Евразийский союз ученых*. 2015. № 5–6 (14). С. 166–168.
8. Щербина Е.В., Данилина Н.В., Маршалкович А.С. Научно-методические основы построения модуля «Проектирование устойчивой городской среды» в процессе обучения бакалавров и магистров по направлению «Градостроительство» // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 1. С. 70–74.
9. Щербина Е.В., Белал А.А. Особенности атрибутирования объектов исторических территорий городов, разрушенных войной // *Жилищное строительство*. 2020. № 4–5. С. 12–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18
10. Щербина Е.В., Слепнев М.А. Экологическое картографирование при градостроительном проектировании природно-антропогенных территориальных комплексов // *Экология урбанизированных территорий*. 2016. № 2. С. 92–97.
11. Кочуров Б.И., Ивашкина И.В. Урболандшафты Москвы и их пространственная трансформация // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 2. С. 48–54.

12. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационная практика в городах и доктрина градостроительства // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. № 3 (7). С. 3–18.

13. Mehdi A. Iraqi Oil: industry evolution and short and medium-term prospects, OIES PAPER: WPM 79, Energy Markets Strategist, Livingstone Partners // Oxford Institute for Energy Studies. 2018. DOI: 10.26889/9781784671211

14. Щербина Е.В., Алсус М.М. Значение природных условий в региональном планировании особенностей пустынного региона Сирии // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 3. С. 107–113. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13107

15. Щербина Е.В., Горбенкова Е.В. Современные подходы градостроительного проектирования сельских поселений и малых городов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 4 (24). С. 105–116.

16. Adil A.K. Basra city: A study in urban geography, thesis of candidate of technical sciences in Geography (Faculty of Arts). 1972. P. 29.

17. Папуш П.С., Маршалкович А.С. Обеспечение экологической безопасности территории в процессе строительства и эксплуатации водных спортивных сооружений // Экология урбанизированных территорий. 2017. № 1. С. 62–68.

18. Belal A., Shcherbina E. Heritage in post-war period challenges and solution // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52. Issue 25. Pp. 252–257. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.491

19. Shcherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 22. Pp. 43131–43138.

20. Егорова С.П., Кротова И.Э., Маршалкович А.С. Градостроительное регулирование территорий с учетом экологических факторов // Строительство: наука и образование. 2015. № 3. С. 1. DOI: 10.22227/2305-5502.2015.3.1

21. 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

Поступила в редакцию 18 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2021 г.

Одобрена для публикации 12 января 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Алексеевич Слепнев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 710075; SlepnevMA@mgsu.ru;

Анвар Сабах Аль-катрани — аспирант кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Aqtrany@yandex.ru.

REFERENCES

1. Krasnoshchekova N.S. *Formation of a natural frame in the General plans of cities*. Moscow, Architecture-S Publ., 2010; 183. (rus.).

2. Kurbatova A.S. *Landscape-ecological analysis of the formation of urban structures*. Moscow; Smolensk, Mandzhenta Publ., 2004; 400. (rus.).

3. Hadeel A., Jabbar M., Chen X. Application of remote sensing and GIS to the study of land use/cover change and urbanization expansion in Basrah province, southern Iraq. *Geo-spatial Information Science*. 2009; 12(2):135-141. DOI: 10.1007/s11806-009-0244-7

4. Mohammed H.S., Muafaq F.A., Abdullah A.A. The standard model of oil characteristics of Zubair reservoir in Luhais field southern Iraq — 2019. *Biochemical and Cellular Archives*. 2019; 19(1):1849-1855.

5. Ben T. Planning southern Iraq: placing the progressive theories of Max Lock in Um Qasr, Margil, and Basra in the context of Iraqi national development,

1954–1956. *Planning Perspectives*. 2018; 34(1):1-22. DOI: 10.1080/02665433.2018.1468806

6. Slepnev M., Shcherbina E., Al-qatrany A.C.D. The use of smart remote sensing technologies in the development of master plans of cities on the example of the city of Basra. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869:022013. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022013

7. Shcherbina E.V. Development of the system of urban planning regulations to ensure sustainable development of territories. *Eurasian Union of scientists*. 2015; 5-6(14):166-168. (rus.).

8. Tscherbina E.V., Danilina N.V., Marshalkovich A.S. Scientifically-methodical bases of the building of the module “Designing the sustainable town environment” in process of the education bachelor and master on direction “Urban planning”. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 1:70-74. (rus.).

9. Shcherbina E.V., Belal A.A. Attribution features of sites in city's historical territories destroyed by war. *Housing Construction*. 2020; 4-5:12-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18 (rus.).
10. Tsherbina E.V., Slepnyov M.A. Ecological mapping at urban design natural-anthropogenic territorial complexes. *Ecology of Urban Areas*. 2016; 2:92-97. (rus.).
11. Kochurov B.I., Ivashkina I.V. Cityscapes of Moscow and their spatial transformation. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 2:48-54. (rus.).
12. Ilyichev V., Yemelyanov S., Kolchunov V., Bakaeva N. The practice of innovations in cities and urban planning and development doctrine. *Human, Region, Technologies*. 2014; 3(7):4-5. (rus.).
13. Mehdi A. Iraqi Oil: industry evolution and short and medium-term prospects, OIES PAPER: WPM 79, Energy Markets Strategist, Livingstone Partners. *Oxford Institute for Energy Studies*. 2018. DOI: 10.26889/9781784671211
14. Shcherbina E.V., Alsus M.M. Value of natural conditions in regional planning peculiarities of the desert region of Syria. *Ecology of Urban Areas*. 2019; 3:107-113. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13107
15. Shcherbina E.V., Gorbenkova E.V. Modern approaches of urban development design of rural settlements and small cities. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2018; 4(24):105-116. (rus.).
16. Adil A.K. *Basra City: A study in Urban Geography, thesis of candidate of technical sciences in Geography (Faculty of Arts)*. 1972; 29.
17. Papush P.P., Marshalkovich A.A. Ensuring the environmental safety of the territory in the process of construction and operation of water sports facilities. *Ecology of Urban Areas*. 2017; 1:62-68. (rus.).
18. Belal A., Shcherbina E. Heritage in post-war period challenges and solution. *IFAC-PapersOnLine*. 2019; 52(25):252-257. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.491
19. Sherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(22):43131-43138.
20. Egorova S., Krotova I., Marshalkovich A. Town-planning management of urban areas with account for ecological factors. *Construction: Science and Education*. 2015; 3:1. DOI: 10.22227/2305-5502.2015.3.1
21. Shcherbina E.V., Belal A.A., Salmo A. Historic centres of Syrian towns ruined by the war: restoration through urban planning. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 15(5):632-640. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.632-640 (rus.).

Received November 18, 2020.

Adopted in revised form on January 12, 2021.

Approved for publication on January 12, 2021.

B I O N O T E S: **Mihail A. Slepnev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate 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: 710075; SlepnevMA@mgsu.ru;

Anwar Sabeeh Al-qatrany — graduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Alqatrany@yandex.ru.

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

УДК 624.078.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29

Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий

В.С. Широков¹, В.Ю. Алпатов², Е.А. Гордеев²

¹ Самарский научно-исследовательский и проектный институт нефтедобычи (СамараНИПИнефть);
 г. Самара, Россия;

² Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предмет исследования — вращательная жесткость узлового соединения каркаса модульных зданий. Жесткость узловых соединений оказывает непосредственное влияние на расчет строительных конструкций, однако в отечественных нормах проектирования отсутствуют прямые указания по данной характеристике. Для модульных зданий характерны нетиповые узловые соединения, поэтому необходимо проводить исследования вращательной жесткости узлов. Цель данной работы — установление границ жестких и полужестких узлов соединения ригеля из швеллера и стойки из квадратной трубы модульных зданий.

Материалы и методы. Классификация узловых соединений принята согласно нормам Eurocode 3, который устанавливает границы для шарнирных, полужестких и жестких узлов. Для вычисления значений начальной вращательной жесткости использован компонентный метод конечных элементов, реализованный в ПК IDEA StatiCA. Рассмотрены варианты с непосредственным примыканием на сварке ригеля к стойке, а также соединения с дополнительным ребром жесткости.

Результаты. Получены значения вращательных жесткостей крепления ригелей к стойкам. Установлено, что при пролетах, характерных для модульных зданий, узлы с непосредственным примыканием швеллеров к стойкам из квадратных труб следует классифицировать в общем случае как полужесткие и учитывать их вращательную жесткость в расчетных схемах. Для узлов с дополнительным ребром изменение вращательной жесткости крепления имеет нелинейный характер. При размерах ребра, близких к размерам сечения стойки, происходит резкое увеличение вращательной жесткости, и соединения переходят в класс жестких.

Выводы. Построена номограмма для различных сечений швеллеров и квадратных труб с минимальными размерами ребер, при которых узел соединения ригеля со стойкой следует считать жестким. Данную номограмму рекомендуется использовать при назначении размеров ребер жесткости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные здания, вращательная жесткость, жесткие узлы, полужесткие узлы, швеллер, труба, ребро жесткости

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции журнала за оперативную работу при подготовке статьи к печати. А также рецензенту за конструктивные замечания, позволившие улучшить содержание статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широков В.С., Алпатов В.Ю., Гордеев Е.А. Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 20–29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29

Research into the stiffness of beam-column joints of modular prefabricated buildings

Viacheslav S. Shirokov¹, Vadim Yu. Alpatov², Evgeniy A. Gordeyev²

¹ Samara research and design institute of oil production (SamaraNIPIneft); Samara, Russian Federation;

² Samara State Technical University; Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Rotational stiffness of a joint in modular building frames is the subject of this research. The stiffness of joints has a direct impact on the analysis of building structures. However, Russian design standards lack any clear instructions concerning this characteristic. Modular buildings have non-standard joints; therefore, it is necessary to study their rotational stiffness. The purpose of this work is to differentiate rigid joints, connecting a channel beam to a square pipe column, from semi-rigid ones.

Materials and methods. Joints are classified according to Eurocode 3, that sets the limits for pinned, rigid and semi-rigid joints. The component-based finite element model implemented in the IDEA StatiCA software package is used to calculate the value of initial rotational stiffness. Two types of joints were studied: one that has an angle stiffener, and the other that has none.

Results. The values of rotational stiffness of beam-column joints are obtained. It's been identified that the joints of spans, typical for modular buildings, having no angle stiffeners, should be classified as semi-rigid and their rotational stiffness should be taken into account in designs. The variability of rotational stiffness of joints, having angle stiffeners, is nonlinear. If the dimensions of an angle stiffener are close to those of the cross section of a column, rotational stiffness rises steeply and joints turn rigid.

Conclusions. A nomogram was made for various sections of channels and pipes having minimum angle stiffener dimensions, ensuring the rigidity of beam-column joints. The nomogram is recommended as a guidance for setting angle stiffener dimensions.

KEYWORDS: modular buildings, rotational stiffness, rigid joints, semi-rigid joints, channel, pipe, angle stiffener

Acknowledgements. The co-authors would like to express gratitude to the editorial staff for the fast preparation of this article for publication. The co-authors are also grateful to the reviewer for his constructive feedback that has enabled them to improve the text of the article.

FOR CITATION: Shirokov V.S., Alpatov V.Yu., Gordeyev E.A. Research into the stiffness of beam-column joints of modular prefabricated buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):20-29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возведение модульных зданий из стальных конструкций — актуальное направление в строительной отрасли. Г.М. Бадьин и С.А. Сычев приводят следующее определение: «Быстровозводимые модульные здания (БМЗ) — это сооружения, монтируемые из объемных унифицированных элементов — блок-модулей заводского изготовления, включая системы внутреннего инженерного оборудования, обеспечивающие заданные физико-механические свойства конструкций, устойчивость, жесткость, прочность, неизменяемость геометрических размеров модулей при их транспортировании и монтаже» [1]. Эти здания являются капитальными постройками, часто имеющими несколько этажей. Они широко применяются при освоении месторождений нефти и газа, в труднодоступных регионах, где используются для обустройства котельных, трансформаторных подстанций и т.п. В таких случаях модульные здания могут иметь повышенный уровень ответственности.

Каркас одного модульного блока обычно состоит из вертикальных стоек, к которым крепятся горизонтальные рамы (рис. 1). Для обеспечения жесткости и геометрической неизменяемости важное значение имеет узел соединения ригелей со стойками [2].

При расчете модульных зданий узел соединения горизонтальных рам и стоек может приниматься жестким или полужестким. Жесткость крепления зависит от конструкции узла соединения и соединяемых элементов. Учет жесткости узлового соединения элементов влияет на распределение усилий в каркасе модульных зданий [3, 4]. При этом в проектной практике стремятся использовать именно жесткие узлы.

Таким образом, следует проводить исследование жесткости узловых соединений определенной

конструкции, но с варьируемыми параметрами с целью нахождения границ конструктивных решений, при которых соединение можно считать жестким.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В строительной практике распространены различные решения узловых соединений элементов модульных зданий [5–8]. Во многом конструкция узлов соединения обусловлена сечениями стоек и горизонтальных рам. Одно из самых распространенных решений — непосредственное примыкание на сварке ригелей из швеллеров к стойкам из квадратных или прямоугольных труб (рис. 2) [9–13]. Далее будем обозначать данный узел «труба – швеллер». Он может быть реализован приваркой ригеля как без ребра, так и с дополнительным вертикальным ребром, которое служит для увеличения жесткости крепления.

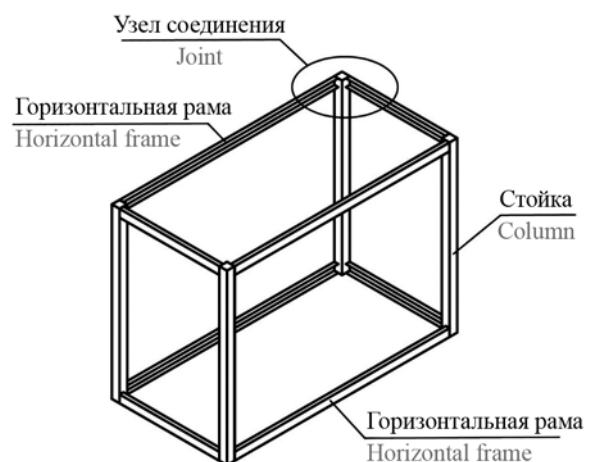


Рис. 1. Схема каркаса модульного блока

Fig. 1. The structural diagram of a modular block

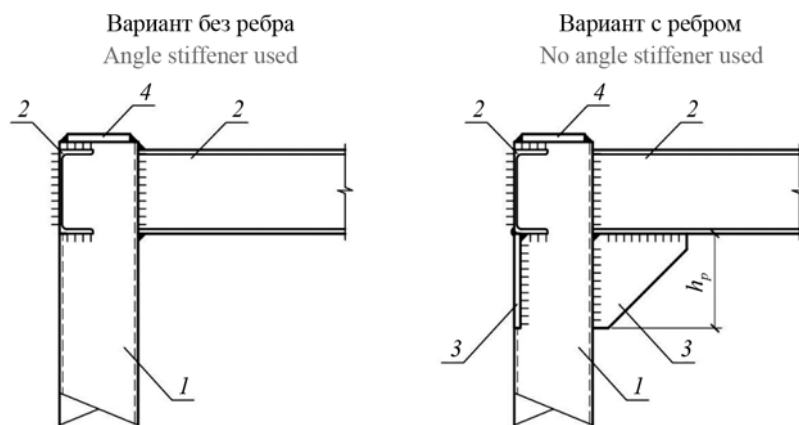


Рис. 2. Схема узла «труба – швеллер»: 1 — стойка; 2 — ригель; 3 — ребро; 4 — заглушка

Fig. 2. The structural diagram of a pipe-channel joint: 1 — column; 2 — crossbar; 3 — angle stiffener; 4 — end plug

Предмет исследования — вращательная жесткость узлового соединения модульного здания типа «труба – швеллер».

В отечественных строительных нормах, к сожалению, отсутствуют прямые указания по классификации узловых соединений стальных конструкций. В связи с этим при принятии решения о том, каким является узел (жестким, полужестким или шарнирным), приходится опираться на типовые решения, зарубежные нормы, а также исследования узловых соединений. Узловые соединения элементов модульных зданий не подходят под типовые решения, поэтому стоит ориентироваться на европейские нормы (Eurocode 3).

Согласно Eurocode 3, по вращательной жесткости $S_{j,ini}$ узлы классифицируются на три группы: жесткие, полужесткие и шарнирные (рис. 3). Вращательная жесткость — момент, вызывающий единичный поворот узла. Для определения жесткости крепления требуется установить зависимость между углом поворота и моментом в узле. В общем случае эта зависимость имеет нелинейный характер, поэтому необходимо определить предельный момент $M_{j,Rd}$, который может выдержать элемент, крепящийся к узлу, или непосредственно само крепление. Начальная вращательная жесткость $S_{j,ini}$ является тангенсом отношения $2/3 \cdot M_{j,Rd}$ к углу поворота сечения при данном значении момента. Граничные значения вращательных жесткостей для жестких и шарнирных креплений определяются в зависимости от изгибной жесткости примыкающих элементов. Условия классификации креплений в соответствии с Eurocode 3 имеют следующий вид:

$$S_{j,ini} > S_{j,R} = k_b EI_b / L_b \text{ — жесткий узел;} \quad (1)$$

$$S_{j,R} > S_{j,ini} > S_{j,P} \text{ — полужесткий узел;} \quad (2)$$

$$S_{j,ini} < S_{j,P} = 0,5 EI_b / L_b \text{ — шарнирный узел,} \quad (3)$$

где $S_{j,R}$, $S_{j,P}$ — предельные значения вращательной жесткости для жестких и шарнирных узлов, соот-

ветственно; k_b — коэффициент, учитывающий наличие вертикальных связей. Для рассматриваемых модульных блоков $k_b = 25$; E — модуль упругости стали; I_b — момент инерции ригеля (крепящегося элемента); L_b — пролет ригеля.

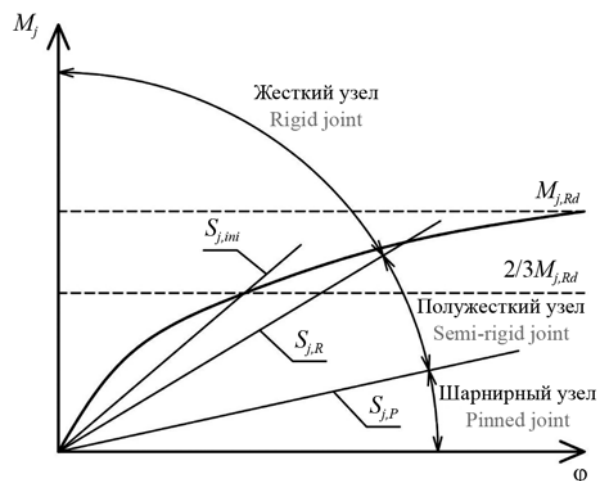


Рис. 3. График классификации узлов согласно зависимости M - ϕ

Fig. 3. The graph describing the stiffness of joints based on the M - ϕ relation

Для определения начальной вращательной жесткости посредством численного эксперимента можно использовать метод конечных элементов (МКЭ) [14–18]. С помощью МКЭ возможно вычислить необходимые параметры для определения $S_{j,ini}$. Однако построение расчетной схемы в МКЭ является довольно трудоемким процессом, при этом при изменении конструкции узла необходимо создавать новую модель. Данный недостаток отсутствует в компонентном методе конечных элементов (КМКЭ), реализованном в ПК IDEA StatiCA [19, 20].

ПК IDEA StatiCA реализует следующие виды расчетов: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) узла, расчет на устойчивость компонентов узла согласно Eurocode, расчет на предельный момент (образование пластического шарнира), расчет предельной нагрузки на узел и расчет жесткости прикрепления элемента. В настоящем исследовании интересен последний режим расчета. С его помощью возможно определить вращательную жесткость прикрепления ригеля к стойке. Программный комплекс производит вычисление $S_{j,ini}$ самостоятельно согласно фактическим деформациям и усилиям, определяемым в процессе расчета и в соответствии с Eurocode 3.

В модульных зданиях к стойке крепятся два ригеля, однако при определении вращательной жесткости важна именно конструкция примыкания одного элемента к другому. Также по условиям построения расчетной модели узла второй ригель пришлось бы закрепить, что не соответствует деформациям модулей при действии поперечной нагрузки, так как вертикальные рамы должны деформироваться совместно. Таким образом, введение в модель узла второго ригеля приведет к недостоверным результатам в сторону увеличения значений вращательной жесткости. Поэтому модель узла состоит из стойки из квадратной трубы и одного ригеля из швеллера (рис. 4).

В расчетной модели стойка служит опорным элементом, она имеет закрепления внизу по всем шести направлениям. Ригель является расчетным элементом, его перемещения ограничены вертикальной плоскостью. Сварные швы крепления наложены с одной стороны по внешнему периметру швеллера. К ригелю приложен единичный изгибающий момент M_{Ed} . В данном случае M_{Ed} задает на-

правление деформации, вычисление предельного момента $M_{j,Rd}$ производится программным комплексом в процессе расчета.

Для проведения исследования выбраны следующие сечения стоек: 80×4 , 80×5 , 80×6 , 90×4 , 90×5 , 90×6 , 100×4 , 100×5 , 100×6 , 120×4 , 120×5 , 120×6 . К каждому варианту сечения стойки последовательно крепились ригели, и определялось значение вращательной жесткости. Было рассмотрено крепление девяти разных сечений ригеля из швеллеров с параллельными полками: 12П, 14П, 16П, 18П, 20П, 22П, 24П, 27П, 30П. При этом по конструктивным соображениям исключены варианты соединений, в которых ширина полки швеллера больше ширины сечения стойки. В рамках данной работы приведены исследования двух вариантов соединения (рис. 2): непосредственное примыкание ригеля без ребра и с ребром жесткости. Ребро принято равностороннее минимальной толщины 4 мм. Размеры ребра h_p изменялись с шагом 10 мм, минимальный размер 40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены значения вращательных жесткостей крепления ригелей к стойкам. Вычисленные значения $S_{j,ini}$, МН·м/рад, приведены в табл. 1.

Для классификации типа узла значения вращательных жесткостей, приведенных в табл. 1, необходимо сопоставить с изгибной жесткостью ригелей, которая зависит от их пролета. Из формулы (1) можно вывести минимальные значения пролетов, при которых узловое соединение можно считать жестким:

$$L_b > k_b EI_b / S_{j,ini} \quad (4)$$

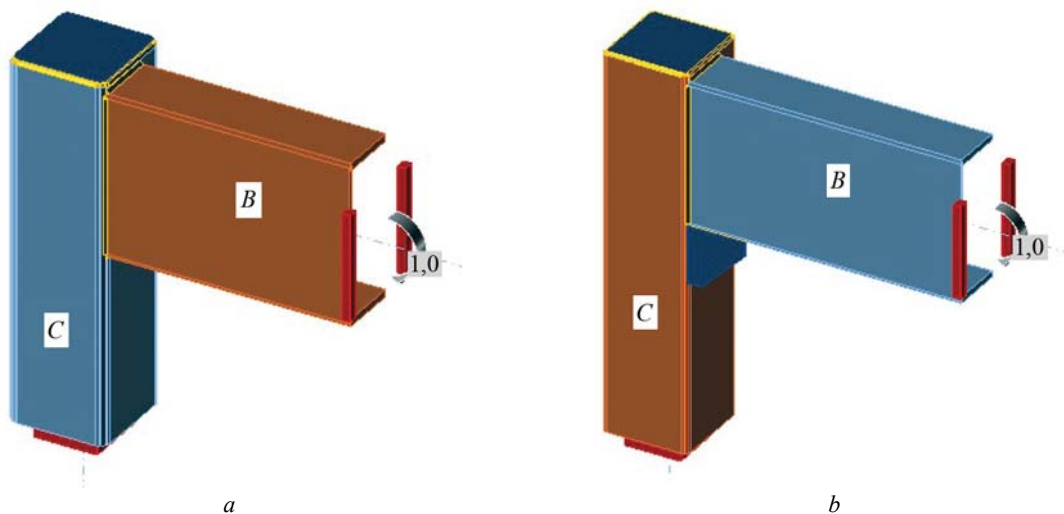


Рис. 4. Модель узла «труба – швеллер» в ПК IDEA StatiCA: а — без ребра; б — с ребром

Fig. 4. A pipe-channel joint model designed by the IDEA StatiCA software: a — no angle stiffener used; b — the angle stiffener is used

Табл. 1. Значения вращательных жесткостей $S_{j,ini}$, МН·м/радTable 1. Rotational stiffness values $S_{j,ini}$, in Newton-meters per radian

Элемент Element		Ригель / Crossbar								
		12П / P	14П / P	16П / P	18П / P	20П / P	22П / P	24П / P	27П / P	30П / P
Стойка Column	80 × 4	1,6	2,3	3,0	5,5	14,2	—	—	—	—
	80 × 5	2,2	3,2	4,6	8,3	22,9	—	—	—	—
	80 × 6	3,0	4,4	6,5	8,7	46,1	—	—	—	—
	90 × 4	1,5	2,2	2,6	3,9	5,9	11,0	∞	—	—
	90 × 5	2,1	2,9	3,8	5,5	8,4	16,8	∞	—	—
	90 × 6	2,8	3,9	5,1	7,4	11,5	24,2	∞	—	—
	100 × 4	1,5	2,1	2,4	3,5	4,8	8,6	10,7	71,2	∞
	100 × 5	2,1	2,9	3,5	4,8	6,5	9,1	16,7	83,1	∞
	100 × 6	2,8	3,7	4,6	6,3	8,7	11,6	23,6	∞	∞
	120 × 4	0,6	2,2	2,4	3,2	4,2	5,1	6,1	9,1	13,6
	120 × 5	1,0	2,9	3,4	4,4	5,6	6,9	8,6	12,9	20,2
	120 × 6	1,4	3,8	4,4	5,7	7,1	8,7	11,3	16,9	28,7

Минимальные пролеты ригелей для жестких узлов при непосредственном примыкании швеллеров к квадратным трубам приведены в табл. 2. Значения табл. 2 вычислены по результатам табл. 1, поэтому для элементов с условно бесконечной вращательной жесткостью крепления минимальный пролет условно равен нулю, т.е. это соединение можно всегда считать жестким. В данном случае к таким узлам относятся соединения швеллеров 24П со стойками из труб 90 × 4, 90 × 5, 90 × 6, швеллеров 27П с трубой 120 × 6, а также 30П с 100 × 4, 100 × 5, 100 × 6. Для подавляющего большинства сечений ригели должны иметь пролет более 6 м. Исключение составляют узловые соединения, в ко-

торых ширина полки швеллера близка к ширине сечения стойки, в этом случае стенки труб выступают в роли ребер жесткости, что приводит к уменьшению углов поворота ригелей и увеличению вращательной жесткости $S_{j,ini}$. Для модульных зданий характерны пролеты в интервале 2,4–6 м, реже до 9 м, поэтому узлы с непосредственным примыканием швеллеров к стойкам из квадратных труб следует классифицировать в общем случае как полужесткие и учитывать их вращательную жесткость в расчетных схемах.

Для наглядности представления результатов на рис. 5 приведен график граничной вращательной жесткости крепления ригеля из швеллера 20П к стой-

Табл. 2. Минимальные значения пролета ригелей для жестких узлов, м

Table 2. Minimal values of the crossbar span for rigid joints, m

Элемент Element		Ригель / Crossbar								
		12П / P	14П / P	16П / P	18П / P	20П / P	22П / P	24П / P	27П / P	30П / P
Стойка Column	80 × 4	10,1	11,3	13,2	10,5	5,7	—	—	—	—
	80 × 5	7,3	8,1	8,6	6,9	3,6	—	—	—	—
	80 × 6	5,4	5,9	6,1	6,6	1,8	—	—	—	—
	90 × 4	10,7	11,8	15,2	14,7	13,7	10,2	0	—	—
	90 × 5	7,7	9,0	10,4	10,5	9,6	6,7	0	—	—
	90 × 6	5,8	6,7	7,8	7,8	7,0	4,6	0	—	—
	100 × 4	10,7	12,4	16,5	16,4	16,8	13,0	14,3	3,1	0
	100 × 5	7,7	9,0	11,3	12,0	12,4	12,3	9,2	2,7	0
	100 × 6	5,8	7,0	8,6	9,1	9,3	9,6	6,5	0	0
	120 × 4	26,7	11,8	16,5	17,9	19,2	21,9	25,1	24,2	22,6
	120 × 5	16,1	9,0	11,6	13,1	14,4	16,2	17,8	17,1	15,2
	120 × 6	11,5	6,9	9,0	10,1	11,4	12,8	13,6	13,0	10,7

кам различного сечения. Сплошной линией обозначена минимальная вращательная жесткость $S_{j,R}$, при которой узел можно считать жестким. Горизонтальными линиями показаны вращательные жесткости, вычисленные в ПК IDEA StatiCA. Согласно условию (1), узел является жестким, если горизонтальная линия лежит выше кривой $S_{j,R}$. Из графика видно, что только соединения швеллера 20П со стойками из труб 80×6 , 80×5 и 80×4 можно классифицировать жесткими при пролете менее 6 м, который характерен для модульных зданий. С увеличением габаритов стойки вращательная жесткость сильно снижается. Соотношение вращательной жесткости, приведенное на графике, характерно для всех рассмотренных вариантов соединений.

Так как большая часть узлов с непосредственным соединением швеллера с трубой является полужесткой, проведено исследование влияния ребер на вращательную жесткость. Согласно табл. 1, минимальную жесткость имеют узлы со стойками с наименьшей толщиной стенки. Поэтому проведено исследование жесткости узлов крепления швеллеров с ребром к стойкам с толщиной стенки 4 мм. Рассмотрено крепление швеллеров 12П, 14П, 16П, 18П, 20П, 22П, 24П, 27П, 30П. На рис. 6 приведены результаты исследования вращательной жесткости крепления швеллера 16П с ребром.

На рис. 6 показаны кривые изменения вращательных жесткостей в зависимости от размеров ребра. Горизонтальными линиями обозначены минималь-

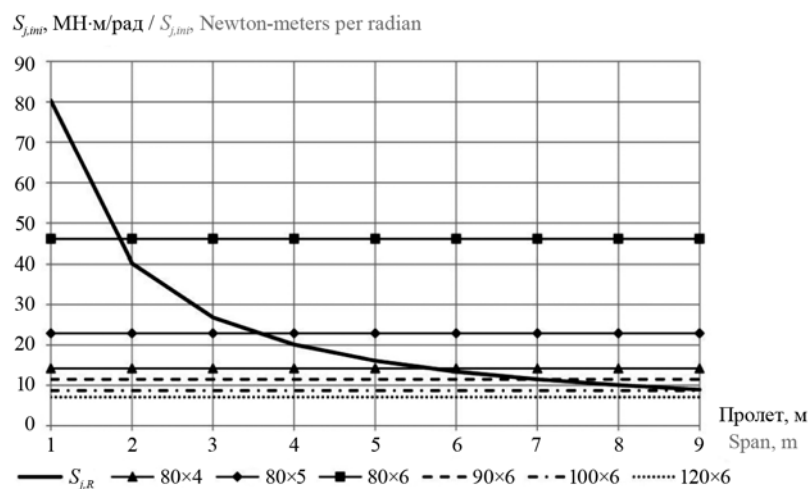


Рис. 5. Граничная вращательная жесткость для ригеля из швеллера 20П

Fig. 5. The limiting value of rotational stiffness of the 20P channel joint

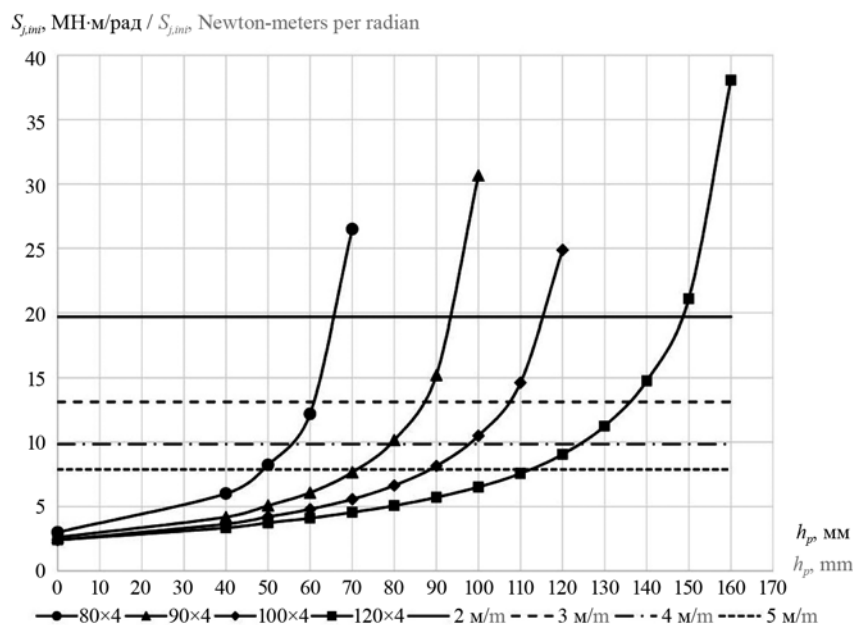


Рис. 6. Вращательная жесткость крепления швеллера 16П с ребром к стойкам различного сечения

Fig. 6. The rotational stiffness of a joint that represents a 16P channel, having an angle stiffener, and columns, having different profiles

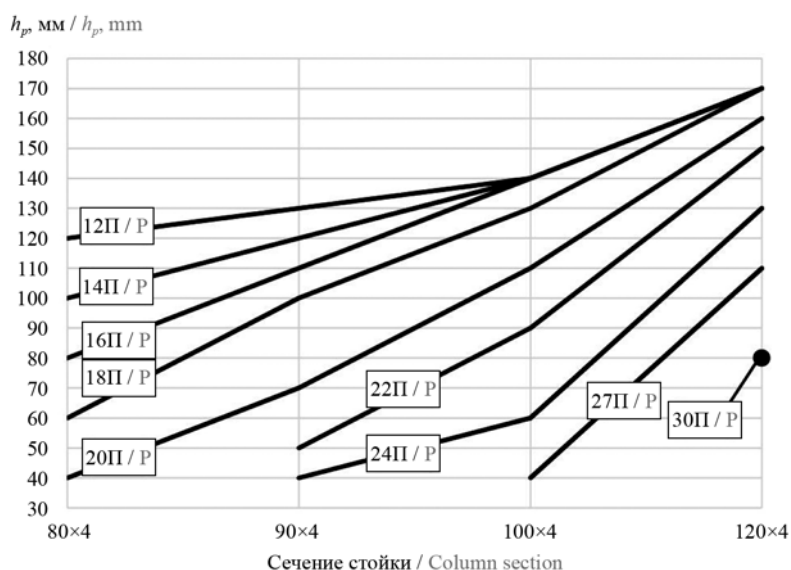


Рис. 7. Размеры ребер для жестких узлов типа «труба – швеллер»

Fig. 7. Dimensions of angle stiffeners for rigid joints of the “pipe-channel” type

ные значения $S_{j,ini}$ для различных пролетов ригеля, при которых узел считается жестким. Из рис. 6 видно, что изменение вращательной жесткости крепления в зависимости от размеров ребра имеет нелинейный характер. При размерах ребра, близких к размерам сечения стойки, происходит резкое увеличение $S_{j,ini}$. Подобный характер изменения наблюдается для всех рассмотренных вариантов сечений ригелей. Исключения составляют только соединения швеллера 20П со стойкой 80×4 и 22П с 90×4 , для которых уже при минимальном размере ребра 40 мм достигаются значения вращательной жесткости выше минимальной, соответствующей жестким узлам.

Размер ребер жесткости для обеспечения жесткого примыкания швеллера к квадратной трубе зависит как от сечения стойки, так и от сечения ригеля. При этом прямую зависимость между этими параметрами установить затруднительно. Поэтому составлена номограмма с минимальными размерами ребер для рассмотренных сечений ригелей в зависимости от сечений стоек, к которым они крепятся (рис. 7). При приведенных на рис. 7 размерах ребра узел типа «труба – швеллер» следует считать жестким.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

- соединения швеллеров со стойками из труб на сварке без ребер жесткости являются полужесткими при пролетах, характерных для модульных зданий. Исключение составляют соединения, в которых ширина ригеля близка к ширине сечения стойки, в таком случае стенки стойки включаются в работу, как ребра жесткости, что приводит к уменьшению углов поворота опорного сечения ригеля. В рассмотренных вариантах узлов это наблюдается у соединений швеллеров 24П со стойками из труб 90×4 , 90×5 , 90×6 ; швеллеров 27П с трубой 120×6 ; а также 30П с трубами 100×4 , 100×5 , 100×6 . Данные соединения можно считать жесткими;

- для обеспечения жесткого примыкания ригеля из швеллера к стойке из квадратной трубы необходимо устраивать ребра жесткости. Минимальные размеры ребер жесткости следует принимать согласно рис. 7.

В рамках данного исследования были найдены параметры узловых соединений модульных зданий, при которых узлы типа «труба – швеллер» — жесткие. Однако рассмотрено лишь два варианта узловых соединений, в модульных зданиях используются и другие соединения ригелей со стойками. Поэтому следует продолжать изучение для иных вариантов соединений. Удобным инструментом для подобных исследований является КМКЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадьин Г.М., Сычев С.А. Взаимное влияние потерь предварительного напряжения и способы их учета // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 219.

2. Широков В.С., Соловьев А.В. Анализ конструктивного исполнения серийных модульных зданий // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 1. С. 24–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.4

3. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33
4. Бакшанский И.С., Жабинский А.Н. Влияние конструктивных особенностей болтовых фланцевых узлов на распределение внутренних усилий в поперечной раме здания // Проблемы современного строительства : мат. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2019. С. 49–59.
5. Холопов И.С., Широков В.С., Соловьев А.В. Усиление несущих конструкций и узловых соединений быстровозводимого модульного здания с целью обеспечения его безопасной эксплуатации // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2015. № 4 (26). С. 56–62.
6. Cho B.-H., Lee J.-S., Kim H., Kim D.-J. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 1929. DOI: 10.3390/app9091929
7. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // Engineering Structures. 2019. Vol. 198. P. 109465. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109465
8. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Simplified structural behaviours // Engineering Structures. 2020. Vol. 227. P. 111409. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111409
9. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220
10. Pang S.D., Liew J.Y.R., Dai Z., Wang Y. Prefabricated prefabricated volumetric construction joining techniques review // Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings. 2016. DOI: 10.29173/mocs31
11. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Zhang Z., Zhang J.-F., Shi F.-W. et al. Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction — A critical review // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 155. P. 106924. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106924
12. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. 2020. Vol. 213. P. 110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
13. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings — An overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.job.2017.12.008
14. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 121–130.
15. Рюмин В.В. Анализ податливости рамных узлов на высокопрочных болтах // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2012. № 16 (1). С. 216–223.
16. Холопов И.С., Алпатов В.Ю., Атаманчук А.В. Современные проблемы проектирования и расчета строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вычислительных комплексов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 1. С. 66–68.
17. Алпатов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследования жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14.
18. Соколов С.А., Качаун А.Н., Скудалов П.О., Черемных С.В. Анализ работы узлов стропильной фермы типа «Молодечно» с учетом физической и геометрической нелинейности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 36–42.
19. Sabatka L., Wald F., Kabelac J., Kolaja D., Pospisil M. Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model // Journal of Civil Engineering and Architecture. 2015. Vol. 9. Issue 8. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002
20. Бароев Р.В. Расчет узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749

Поступила в редакцию 27 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 29 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Вячеслав Сергеевич Широков — ведущий инженер; Самарский научно-исследовательский и проектный институт нефтедобычи («СамараНИПИнефть»); 443010, г. Самара, ул. Вилоновская, д. 18; РИНЦ ID: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Вадим Юрьевич Алпатов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 258611, ResearcherID: N-7638-2016, ORCID: 0000-0003-2707-6104; avu75@mail.ru;

Евгений Александрович Гордеев — магистр кафедры стоимостного инжиниринга и технической экспертизы зданий и сооружений; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; zhenyagordeyev@mail.ru.

REFERENCES

1. Badin G.M., Sychev S.A. Analysis an error of the installation and operation of pre-fabricated structures. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 2:219. (rus.).
2. Shirokov V.S., Soloviev A.V. Analysis of constructive performance of standard modular buildings. *Urban Construction and Architecture*. 2018; 8(1):24-27. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.4 (rus.).
3. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33 (rus.).
4. Bakshanskiy I.S., Zhabinskiy A.N. Influence of constructive features of bolt flange units on the distribution of internal forces in the transverse frame of a building. *Problems of modern construction: materials of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk, 2019; 49-59. (rus.).
5. Kholopov I.S., Shirokov V.S., Solovev A.V. Strengthening of the bearing constructions and nodal connections of the prefabricated modular building for the purpose of ensuring its safe operation. *Vestnik LSTU*. 2015; 4(26):56-62. (rus.).
6. Cho B.-H., Lee J.-S., Kim H., Kim D.-J. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*. 2019; 9:1929. DOI: 10.3390/app9091929
7. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies. *Engineering Structures*. 2019; 198:109465. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109465
8. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Simplified structural behaviours. *Engineering Structures*. 2020; 227:111409. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111409
9. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018*. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220
10. Pang S.D., Liew J.Y.R., Dai Z., Wang Y. Pre-fabricated prefinished volumetric construction joining techniques review. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*. 2016. DOI: 10.29173/mocs31
11. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Zhang Z., Zhang J.-F., Shi F.-W. et al. Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction — A critical review. *Thin-Walled Structures*. 2020; 155:106924. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106924
12. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020; 213:110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
13. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings — An overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.12.008
14. Nadolski V.V. Calculation and construction of the flange connection of rectangular elements subjected to the axial tension. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2018; 8:121-130. (rus.).
15. Rumin V.V. Analysis of rigidity of beam to column moment connections with high strength bolts. *Modern Structures of Metal and Wood*. 2012; 16(1):216-223. (rus.).
16. Kholopov I. S., Alpatov V.Yu., Ataman-chuk A.V. The modern problems in the field of design and computation works with structural elements for buildings and structures with the use of computation systems. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2008; 1:66-68. (rus.).
17. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Saharov A.A. The study of rigidity of a steel column base assembly consisting of a support plate. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:9-14. (rus.).
18. Sokolov S.A., Kachaun A.N., Skudalov P.A., Cheremnykh S.V. Analysis of the Molodechno type truss beam nodes, taking into account the physical and geometric nonlinearity. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical and chemical engineering*. 2019; 2(2):36-42. (rus.).

19. Sabatka L., Wald F., Kabelac J., Kolaja D., Pospisil M. Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015; 9(8). DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002
20. Baroev R.V. *Calculation of connections of steel structures by the component based finite element model*. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749 (rus.).

Received November 27, 2020.

Adopted in revised form on December 29, 2020.

Approved for publication on December 29, 2020.

B I O N O T E S: **Viacheslav S. Shirokov** — lead engineer; **Samara research and design institute of oil production (SamaraNIPIneft)**; 18 Vilonovskaya st., Samara, 443010, Russian Federation; ID RISC: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Vadim Yu. Alpatov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RISC: 258611, ResearcherID: N-7638-2016, ORCID: 0000-0003-2707-6104; avu75@mail.ru;

Evgeniy A. Gordeyev — Master of the Department of Cost Engineering and Technical Expertise of Buildings and Structures; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; zhenyagordeyev@mail.ru.

Численно-аналитический расчет продольного изгиба призматических упругих стержней при действии осевой сжимающей нагрузки с учетом собственного веса

С.Б. Языев, А.С. Чепурненко, А.А. Аваков

Донской государственный технический университет (ДГТУ);
г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена проблема расчета устойчивости сжатых стержней с учетом их собственного веса. Получено разрешающее дифференциальное уравнение второго и четвертого порядка относительно безразмерного прогиба. Предложена методика численно-аналитического и численного решения полученного уравнения с использованием функции в виде степенного ряда и метода конечных разностей. В результате при численной реализации проблема была сведена к обобщенной задаче на собственные значения. Приведено сравнение с решением других авторов.

Материалы и методы. Задача определения критических значений для стержней ставится как задача нахождения области определения этих значений в зависимости от граничных условий и безразмерных параметров α и β , соответствующих сосредоточенной силе и распределенной нагрузке от собственного веса. В качестве функции, аппроксимирующей прогиб, выступает сходящийся степенной ряд с неопределенными коэффициентами. Решение задачи устойчивости призматического стержня выполняется в среде MatLab. Находятся значения α и β , соответствующие минимуму критической нагрузки.

Результаты. Для апробации методики решен ряд задач и выполнено сравнение с известными решениями.

Выводы. Предлагаемая методика, в отличие от аналитических решений, позволяет решить задачу с произвольной фиксацией концов стержня. Также можно учитывать изменяющуюся по длине жесткость и неоднородность стержня. Тестовые задачи показали хорошее согласие с литературными данными. В дальнейшем планируется разработать методику расчета с учетом ползучести. Показано более высокое качество аналитического решения по сравнению с имеющимися методиками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость, степенной ряд, изгиб, собственные значения, область устойчивости, критическая нагрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Языев С.Б., Чепурненко А.С., Аваков А.А. Численно-аналитический расчет продольного изгиба призматических упругих стержней при действии осевой сжимающей нагрузки с учетом собственного веса // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 30–40. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.30-40

Numerical and analytical calculation of the buckling of elastic prismatic rods under the action of axial compressive loading with account for the dead load

Serdar B. Yazyev, Anton S. Chepurnenko, Arthur A. Avakov

Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the problem of stability of compressed rods with regard for the dead load. A resolving differential equation of the second and fourth order with respect to dimensionless deflection is obtained. A methodology underlying numerical-analytical and numerical solutions to the obtained equation is proposed. It employs the power series and the finite difference method. As a result, the numerical solution is reduced to the generalized eigenvalue problem. A comparison with the solution developed by other authors is provided.

Materials and methods. The problem of determining critical values, applicable to rods, is formulated as the task of identifying the domain of these values depending on the boundary conditions and dimensionless coefficients α and β that correspond to the concentrated force and the distributed load of the dead load. The function, approximating the deflection, represents the power series having indefinite coefficients. The objective function represents converging power series having unknown coefficients. The solution to the stability problem of a prismatic rod is obtained in the MatLab environment. The values of α and β are found; they correspond to the minimal critical load.

Results. Several problems were solved and new solutions were compared with the well-known ones in order to test the methodology.

Conclusions. Unlike analytical solutions, the proposed methodology allows to solve the problem, if the ends of the rod are fixed arbitrarily. One can also take account of the rod stiffness that varies along the length, as well as the heterogeneity of the rod. Test problems show good convergence with the data provided in the sources. In the future, the methodology will take account of creep. A higher quality analytical solution, surpassing other existing methods, is demonstrated.

KEYWORDS: stability, power series, bending, eigenvalues, stability domain, critical load

FOR CITATION: Yazyev S.B., Chepurnenko A.S., Avakov A.A. Numerical and analytical calculation of the buckling of elastic prismatic rods under the action of axial compressive loading with account for the dead load. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):30-40. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.30-40 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы расчета сжатых стержней на устойчивость исследуются многими авторами, из последних публикаций стоит отметить работы [1–19]. В статьях [1–3] рассматривается решение этой проблемы с учетом ползучести с использованием метода конечных разностей. В работах [4, 5] применен энергетический метод в форме Ритца – Тимошенко. Метод конечных элементов Бубнова – Галеркина [6–9] также может быть использован для расчета сжатых стержней, в том числе и при ползучести. Проблемы динамической устойчивости стержней обсуждаются в трудах [10–16]. В публикациях [17–19] для расчета устойчивости стержней подключен аппарат теории вероятностей. Однако ни в одной из указанных работ не изучаются вопросы устойчивости с учетом собственного веса. Существующие аналитические решения [20–24] применимы только для конкретных закреплений концов стержня.

Рассмотрим однородный, прямолинейный, вертикально расположенный стержень при произвольном закреплении его концов, испытывающий указанную нагрузку (сжимающая сила и собственный вес).

Выделим некоторый бесконечно малый участок стержня, отстающий от начала координат на расстоянии t в пределах интервала $[0, x]$ и имеющий размер dt (рис. 1):

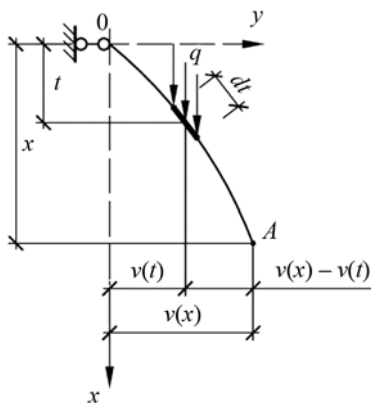


Рис. 1. Элемент dt бесконечно малого участка стержня

Fig. 1. Element dt of an infinitely small rod section

Считаем, что в пределах рассматриваемого элемента $v(t) = \text{const}$, где $v(t)$ — величина прогиба в центре бесконечно малого элемента dt ; а $[v(x) - v(t)]$ — плечо, создаваемое нагрузкой q , действующей на бесконечно малый элемент dt относительно точки A . Тогда момент, относительно данной точки составит:

$$M_A = q \int_0^x [v(x) - v(t)] dt = qv(x)x - q \int_0^x v(t) dt.$$

Чтобы учесть все варианты закрепления, рассмотрим жесткую заделку, подвижную вдоль оси x (рис. 2).

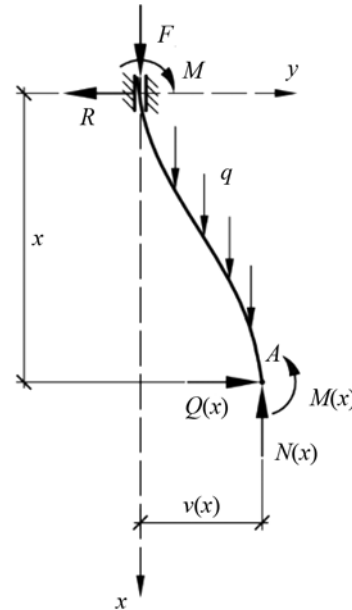


Рис. 2. Принятая схема сил при составлении выражения для изгибающего момента в сечении

Fig. 2. A pattern of forces used to make an equation describing the bending moment at a section

В этом случае в сечении A момент равен:

$$M(x) = Fv(x) + \left\{ qv(x)x - q \int_0^x v(t) dt \right\} + Rx - M. \quad (1)$$

С другой стороны, в случае малых деформаций, дифференциальное уравнение изогнутой оси будет следующим:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI_z}, \quad (2)$$

где $M(x)$ — изгибающий момент; E — модуль Юнга материала; I_z — осевой момент инерции.

Тогда интегро-дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня принимает вид:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = -\frac{1}{EI_z} \left[Fv(x) + \left\{ qv(x)x - q \int_0^x v(t) dt \right\} + Rx - M \right]. \quad (3)$$

Далее удобно представлять разрешающие уравнения в безразмерных величинах. Сделаем следующую замену:

$$x = l\varphi; \quad t = l\xi; \quad \begin{cases} v(x) = lv(\varphi); \\ v(t) = lv(\xi), \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = \frac{1}{l^2} \frac{d^2 v(x)}{d\varphi^2} \xrightarrow{v(x) \rightarrow v(\varphi)} \frac{1}{l^2} \frac{ld^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} = \frac{1}{l} \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2}. \quad (5)$$

Слагаемое соотношения (3) в фигурной скобке с интегралом перепишем в относительных координатах:

$$\frac{q}{EI_z} \int_0^x v(t) dt = \frac{q}{EI_z} \int_0^\varphi lv(\xi) l d\xi = \frac{ql^2}{EI_z} \int_0^\varphi v(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Выражение (3) с учетом (5) перепишем в безразмерных координатах:

$$\frac{1}{l} \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} + \frac{Fl}{EI_z} v(\varphi) + \frac{qlv(\varphi)}{EI_z} l\varphi - \frac{ql^2}{EI_z} \int_0^\varphi v(\xi) d\xi = - \left(\frac{R\varphi l}{EI_z} - \frac{M}{EI_z} \right). \quad (7)$$

Умножив выражение (7) на l , окончательно в безразмерных координатах представим:

$$\frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} + \alpha^2 v(\varphi) + \beta^3 \varphi v(\varphi) - \beta^3 \int_0^\varphi v(\xi) d\xi = m - r\varphi, \quad (8)$$

где

$$\alpha^2 = \frac{Fl^2}{EI_z}; \quad \beta^3 = \frac{ql^3}{EI_z}; \quad m = \frac{Ml}{EI_z}; \quad r = \frac{Rl^2}{EI_z}. \quad (9)$$

Так как решение будет приведено и численно, для удобства интегрирования при различных граничных условиях продифференцируем выражение (8) дважды:

$$\frac{d^4 v(\varphi)}{d\varphi^4} + \alpha^2 \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} + \beta^3 \left[\frac{dv(\varphi)}{d\varphi} + \varphi \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} \right] = 0. \quad (10)$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение (10) будем искать в виде степенного ряда:

$$v(\varphi) = \sum_{k=0}^n A_k \varphi^k. \quad (11)$$

Ниже приведем с первой по четвертую производные $v(\varphi)$:

$$\begin{aligned} \frac{dv(\varphi)}{d\varphi} &= \sum_{k=1}^n k A_k \varphi^{k-1}; \quad \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} = \sum_{k=2}^n k(k-1) A_k \varphi^{k-2}; \\ \frac{d^3 v(\varphi)}{d\varphi^3} &= \sum_{k=3}^n k(k-1)(k-2) A_k \varphi^{k-3}; \\ \frac{d^4 v(\varphi)}{d\varphi^4} &= \sum_{k=4}^n k(k-1)(k-2)(k-3) A_k \varphi^{k-4}; \end{aligned} \quad (12)$$

Для одинаковой степени при φ^{k-4} , как, например, у 4-й производной, запишем (12) иначе:

$$\begin{aligned} \frac{dv(\varphi)}{d\varphi} &= \sum_{k=4}^{n+1} A_{k-3} (k-3) \varphi^{k-4}; \quad \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} = \\ &= \sum_{k=4}^{n+2} A_{k-2} (k-3)(k-2) \varphi^{k-4}; \\ \varphi \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} &= \sum_{k=2}^n A_k k(k-1) \varphi^{k-1} = \\ &= \sum_{k=5}^{n+3} A_{k-3} (k-4)(k-3) \varphi^{k-4}; \\ \frac{d^4 v(\varphi)}{d\varphi^4} &= \sum_{k=4}^n k(k-1)(k-2)(k-3) A_k \varphi^{k-4}. \end{aligned} \quad (13)$$

После подстановки соответствующих производных в уравнение (10) и, сократив на $(k-3)$, получим:

$$\begin{aligned} \sum_{k=4}^n k(k-1)(k-2) A_k \varphi^{k-4} &= \alpha^2 \sum_{k=4}^{n+2} A_{k-2} \varphi^{k-4} - \\ - \beta^3 \left[\sum_{k=4}^{n+1} A_{k-3} \varphi^{k-4} + \sum_{k=5}^{n+3} A_{k-3} (k-4) \varphi^{k-4} \right] &= 0. \end{aligned}$$

Или, приравнявая коэффициенты при φ^{k-4} , получим:

$$A_k = - \frac{[\alpha^2 A_{k-2} (k-2) + \beta^3 A_{k-3} (k-3)]}{k(k-1)(k-2)}. \quad (14)$$

Определим коэффициенты при φ^0 :

$$v(\varphi) = A_0 + A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3 + \sum_{k=4}^n A_k \varphi^k;$$

$$\begin{aligned} \frac{dv(\varphi)}{d\varphi} &= A_1 + 2A_2 \varphi + 3A_3 \varphi^2 + 4A_4 \varphi^3 + \\ &+ 5A_5 \varphi^4 + 6A_6 \varphi^5 \dots; \\ \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} &= 2A_2 + 6A_3 \varphi + 12A_4 \varphi^2 + \\ &+ 20A_5 \varphi^3 + 30A_6 \varphi^4 \dots; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \varphi \frac{d^2 v(\varphi)}{d\varphi^2} &= 2A_2 \varphi + 6A_3 \varphi^2 + 12A_4 \varphi^3 + \\ &+ 20A_5 \varphi^4 + 30A_6 \varphi^5 \dots; \\ \frac{d^3 v(\varphi)}{d\varphi^3} &= 6A_3 + 24A_4 \varphi + 60A_5 \varphi^2 + 120A_6 \varphi^3 \dots; \\ \frac{d^4 v(\varphi)}{d\varphi^4} &= 24A_4 \varphi + 120A_5 \varphi^2 + 360A_6 \varphi^3 \dots; \end{aligned}$$

Подставим соответствующие слагаемые при φ^0 в (15):

$$A_4 = - \frac{[\alpha^2 2A_2 + \beta^3 A_1]}{24}. \quad (16)$$

Подставим соответствующие слагаемые при φ^1 в (15):

$$A_5 = - \frac{[\alpha^2 6A_3 + \beta^3 4A_2]}{24}. \quad (17)$$

Рассмотрим граничные условия для различных закреплений стержня:

1. Шарнир-шарнир

$$v(0) = 0; \frac{d^2v(0)}{d\phi^2} = 0; v(1) = 0; \frac{d^2v(1)}{d\phi^2} = 0; \quad (18)$$

2. Шарнир-защемление

$$v(0) = 0; \frac{d^2v(0)}{d\phi^2} = 0; v(1) = 0; \frac{dv(1)}{d\phi} = 0; \quad (19)$$

3. Защемление-шарнир

$$v(0) = 0; \frac{dv(0)}{d\phi} = 0; v(1) = 0; \frac{d^2v(1)}{d\phi^2} = 0; \quad (20)$$

4. Защемление-защемление

$$v(0) = 0; \frac{dv(0)}{d\phi} = 0; v(1) = 0; \frac{dv(1)}{d\phi} = 0. \quad (21)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Был выполнен расчет стержней в соответствии с закреплениями, представленными на рис. 3–6.

Задача 1. Вариант закрепления стержня «шарнир-шарнир»

Рассмотрим более подробно задачу для стержня с учетом собственного веса при варианте закрепления «шарнир-шарнир» (рис. 3).

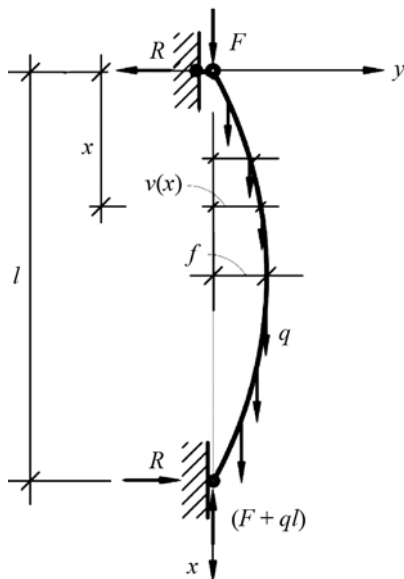


Рис. 3. Расчетная схема «шарнир-шарнир»

Fig. 3. A hinge-hinge design pattern

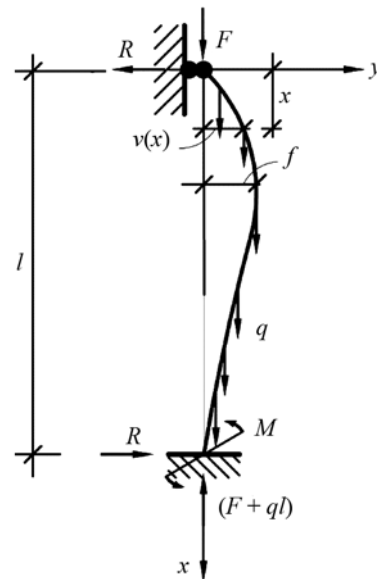


Рис. 4. Расчетная схема «шарнир-защемление»

Fig. 4. A hinge-pinch design pattern

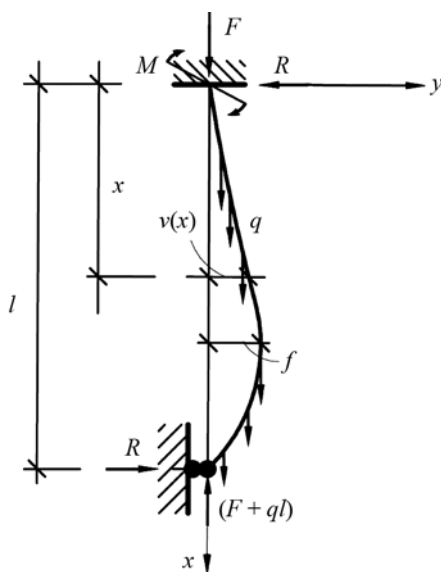


Рис. 5. Расчетная схема «защемление-шарнир»

Fig. 5. A pinch-hinge design pattern

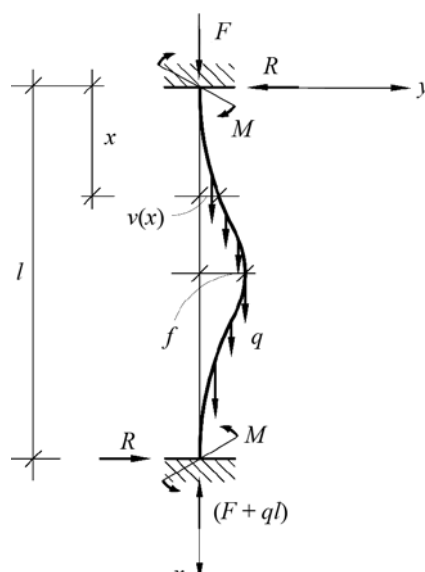


Рис. 6. Расчетная схема «защемление-защемление»

Fig. 6. A pinch-pinch design pattern

Из граничных условий:

$$v(0) = 0; \rightarrow A_0 = 0; \frac{d^2 v(0)}{d\varphi^2} = 0; \rightarrow A_2 = 0;$$

$$v(1) = 0; \rightarrow \sum_{k=0}^n A_k = 0 \rightarrow k_{11} A_1 + k_{13} A_3 = 0.$$

Чтобы определить ряд k_{11} , используем $\sum_{k=0}^n A_k$, но полагаем в этой сумме $A_1 = 1, A_3 = 0$.

Чтобы определить k_{13} , используем $\sum_{k=0}^n A_k$, но полагаем в этой сумме $A_1 = 0, A_3 = 1$.

$$\frac{d^2 v(1)}{d\varphi^2} = 0; \rightarrow \sum_{k=4}^{n+2} A_{k-2} (k-3)(k-2) = 0 \rightarrow k_{31} A_1 + k_{33} A_3 = 0.$$

Чтобы определить k_{31} , используем

$$\sum_{k=4}^{n+2} A_{k-2} (k-3)(k-2), \text{ но полагаем в этой сумме } A_1 = 1, A_3 = 0.$$

Чтобы определить k_{13} , используем

$$\sum_{k=4}^{n+2} A_{k-2} (k-3)(k-2), \text{ но полагаем в этой сумме } A_1 = 0, A_3 = 1.$$

Полученные соотношения запишем

$$\begin{cases} k_{11} A_1 + k_{13} A_3 = 0 \\ k_{31} A_1 + k_{33} A_3 = 0 \end{cases}.$$

Условие существования ненулевых решений

$$D = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} \\ k_{31} & k_{33} \end{vmatrix} = 0.$$

Последовательность численной реализации состоит в следующем: задается $\alpha = 0; 0,1; 0,2 \dots \pi$ из условия $D = 0$, и определяем значения β путем решения нелинейного уравнения в среде MatLab с использованием функции *fzero*. Результаты приведены в таблице.

Зависимость коэффициентов β от α при закреплении «шарнир-шарнир»

Dependence of β coefficients on α for the hinge-hinge pattern

α	β	α	β	α	β
0	2,648057	1,1	2,540819	2,2	2,135201
0,1	2,647209	1,2	2,519243	2,3	2,071442
0,2	2,644669	1,3	2,495281	2,4	1,999977
0,3	2,640422	1,4	2,468781	2,5	1,919087
0,4	2,634448	1,5	2,439619	2,6	1,826341
0,5	2,626722	1,6	2,407531	2,7	1,71802
0,6	2,617205	1,7	2,372278	2,8	1,587946
0,7	2,605857	1,8	2,333558	2,9	1,424479
0,8	2,592618	1,9	2,291001	3,0	1,200214
0,9	2,577424	2,0	2,244158	3,1	0,803247
1,0	2,560195	2,1	2,196462	3,141593	0,0

Графическая зависимость между α, β показана на рис. 7.

При $\alpha = \pi$ и $\beta = 0$, согласно выражению (9), получим формулу Л. Эйлера [25], а при $\alpha = 0$ и $\beta = 2,648057$, согласно (9), получим формулу А.Н. Динника [22]:

$$l_{кр} = 2,65 \sqrt{\frac{EI_z}{q}}. \quad (22)$$

Зависимость на рис. 7 приближенно можно аппроксимировать следующей кривой [24]:

$$\alpha^2 + a\beta^3 = b. \quad (23)$$

Определив постоянные a и b при значениях α и β на осях, получим:

$$\alpha^2 + 0,532\beta^3 = \pi^2 \quad (24)$$

или, учитывая (9)

$$F + 0,532ql = \frac{\pi^2 EI_z}{l^2}. \quad (25)$$

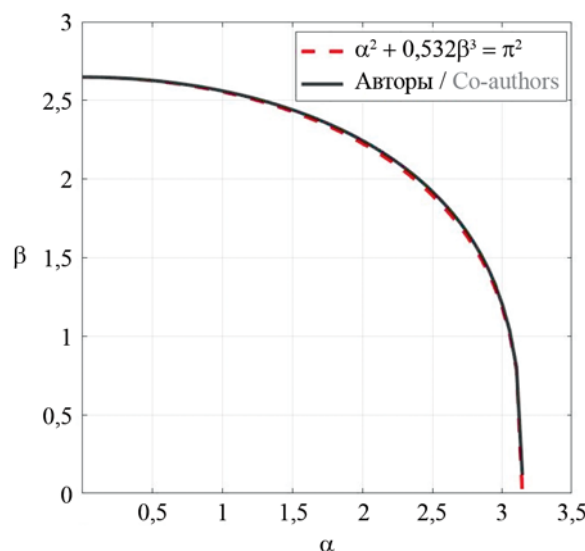


Рис. 7. Область устойчивости стержня, шарнирно закрепленного на концах

Fig. 7. The stability domain for a rod hinged at the ends

Резюмируя вышесказанное, отметим, что значения α и β , определяемые по формуле (24), т.е.

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{(\pi^2 - \alpha^2)}{0,532}} \quad (26)$$

лежат внутри области устойчивости, что идет в запас устойчивости. Эта зависимость на рис. 7 показана пунктирной линией.

Найдем сечение, где прогиб принимает наибольшее значение. Напомним, что мы рассматриваем случай «шарнир-шарнир» с учетом собственного веса.

Граничные условия:

$$v(1) = 0; \rightarrow \sum_{k=0}^n A_k; k_{11} A_1 + k_{13} A_3 = 0;$$

Чтобы определить ряд k_{11} , используем $\sum_{k=0}^n A_k$, но полагаем в ней $A_1 = 1, A_3 = 0$.

Чтобы определить k_{13} , используем $\sum_{k=0}^n A_k$, но полагаем в ней $A_1 = 0, A_3 = 1$.

$$\frac{dv(\mu)}{d\varphi} = 0; \rightarrow \sum_{k=4}^{n+1} A_{k-3} (k-3) \varphi^{k-4}; k_{31}^* A_1 + k_{33}^* A_3 = 0.$$

Чтобы определить k_{31}^* , используем

$$\sum_{k=4}^{n+1} A_{k-3} (k-3) \varphi^{k-4}, \text{ но полагаем в ней } A_1 = 1, A_3 = 0.$$

Чтобы определить k_{33}^* , используем

$$\sum_{k=4}^{n+1} A_{k-3} (k-3) \varphi^{k-4}, \text{ но полагаем в ней } A_1 = 0, A_3 = 1.$$

Откуда:

$$D_1 = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} \\ k_{31}^* & k_{33}^* \end{vmatrix} = 0.$$

Числовой поиск ведем, используя найденную зависимость между α и β (рис. 7), т.е. при $\alpha = 0$ и $\beta = 2,648057$ находим $\mu = 0,542750$, а при α и $\beta = 0 \rightarrow \mu = 0,5$.

Итак, максимальный прогиб лежит в пределах:

$$0,5l < x_0 < 0,542750l, \quad (27)$$

где $x_0 = 0,5l$, получится при $q = 0$, а $x_0 = 0,542750l$ при $F = 0$.

Отметим, что задача решалась в предположении, что материал стержня при сжатии не получает пластических деформаций, т.е. напряжения, возникающие при критических нагрузках, меньше предела пропорциональности. Отсюда, при гибкости стержня λ большей λ_{np} применима формула (25) и наоборот.

В случае пластических деформаций, формула (25) принимает следующий вид:

$$F + 0,532ql = \frac{\pi^2 E_{np} I_z}{l^2}, \quad (28)$$

где

$$E_{np} = \frac{I_1 E_k + I_2 E}{I_z}, \quad (29)$$

где I_1 и I_2 — моменты инерции зон догрузки и разгрузки относительно нулевой линии; I_z — момент инерции всего сечения относительно центральной оси; E_k — касательный модуль.

Задача 2. Вариант закрепления стержня «шарнир-защемление»

Рассмотрим стержень, у которого верхний конец шарнирный, а нижний конец защемлен (рис. 4). Согласно граничным условиям (19), определяем коэффициенты A_0, A_2 , числовой поиск аналогичен предыдущему. Зависимость между α и β приведена на рис. 8.

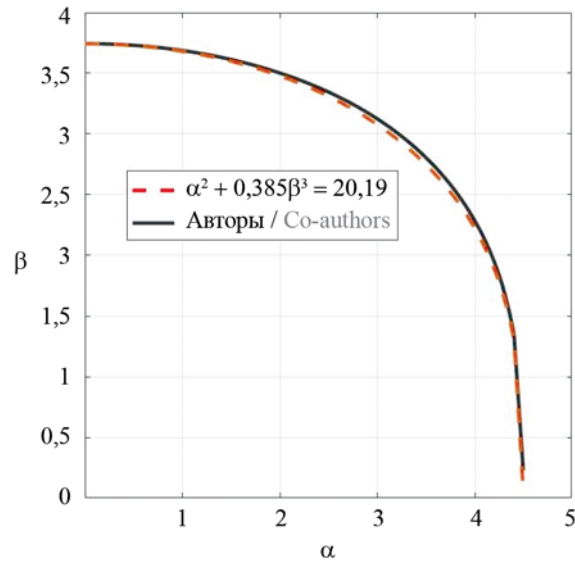


Рис. 8. Область устойчивости для стержня, верхний конец которого шарнирно закреплен, а нижний жестко зажат

Fig. 8. The stability domain for a rod, whose upper end is hinged and lower end is rigidly clamped

При $\alpha = 4,493407$ и $\beta = 0$, учитывая (9), получаем формулу Ф.С. Ясинского [23]:

$$F_{кр} = \frac{20,19EI_z}{l^2}. \quad (30)$$

При $\alpha = 0$ и $\beta = 3,744452$, учитывая (9), получаем формулу А.Н. Динника [22]:

$$l_{кр} = 3,74 \sqrt{\frac{EI_z}{q}}. \quad (31)$$

Определив постоянные a и b при значениях α и β на осях в выражении (8), приближенную зависимость в данном случае получим в следующем виде:

$$\alpha^2 + 0,385\beta^3 = 20,19$$

или, учитывая (9):

$$F + 0,385ql = \frac{20,19EI_z}{l^2}. \quad (32)$$

Отметим, что значения α и β , определяемые по приближенной зависимости, также лежат внутри области устойчивости (рис. 8), а наибольший прогиб при

$$0,4l < x_0 < 0,46l, \quad (33)$$

где $x_0 = 0,4l$, получится при $q = 0$, а $x_0 = 0,46l$ при $F = 0$.

Задача 3. Вариант закрепления стержня «защемление-шарнир»

Рассмотрим стержень, у которого верхний конец защемлен, а нижний конец шарнирный (рис. 5). Согласно граничным условиям (18), определяем коэффициенты A_0, A_2 , а числовой поиск аналогичен предыдущему.

Зависимость между α и β графически изображена на рис. 9. При $\alpha = 4,4934070$ и $\beta = 0$, учитывая формулу (9), получаем формулу (28) Ф.С. Ясинского [23].

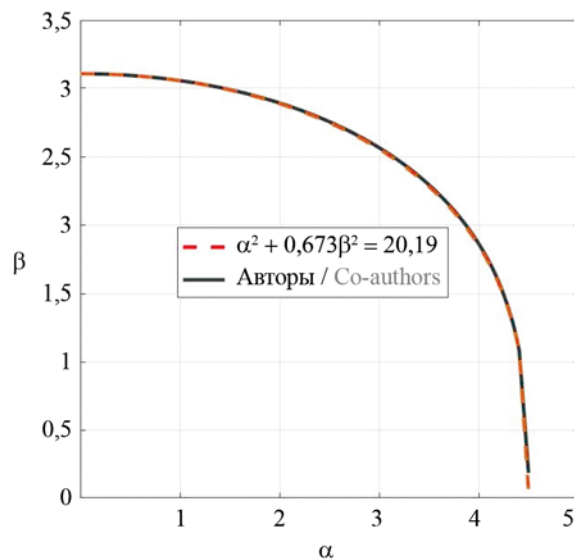


Рис. 9. Область устойчивости стержня, верхний конец которого жестко зажат, а нижний шарнирно закреплен
Fig. 9. The stability domain for the rod, whose upper end is rigidly clamped, and the lower end is hinged

При $\alpha = 0$ и $\beta = 3,107555$, учитывая выражение (9), уточняем формулу А.Н. Динника [22], у которого коэффициент 3,09:

$$l_{кр} = 3,11\sqrt{\frac{EI_z}{q}}. \quad (34)$$

Приближенная зависимость (23) в такой схеме закрепления имеет следующий вид:

$$\alpha^2 + 0,673\beta^2 = 20,19$$

или, учитывая (9):

$$F + 0,673ql = \frac{20,19EI_z}{l^2}. \quad (35)$$

Отметим, что значения α и β , определяемые по приближенной зависимости, также занижают точные значения. Наибольший прогиб (рис. 5) при

$$0,6l < x_0 < 0,63l, \quad (36)$$

где $x_0 = 0,6l$, получится при $q = 0$, а $x_0 = 0,63l$, получится при $F = 0$.

Задача 4. Вариант закрепления стержня «защемление-защемление»

Рассмотрим стержень, у которого верхний и нижний концы защемлены (рис. 6). Согласно граничным условиям (21), определяем коэффициенты A_0, A_2 , а числовой поиск аналогичен предыдущему. Зависимость между α и β приведена на рис. 10.

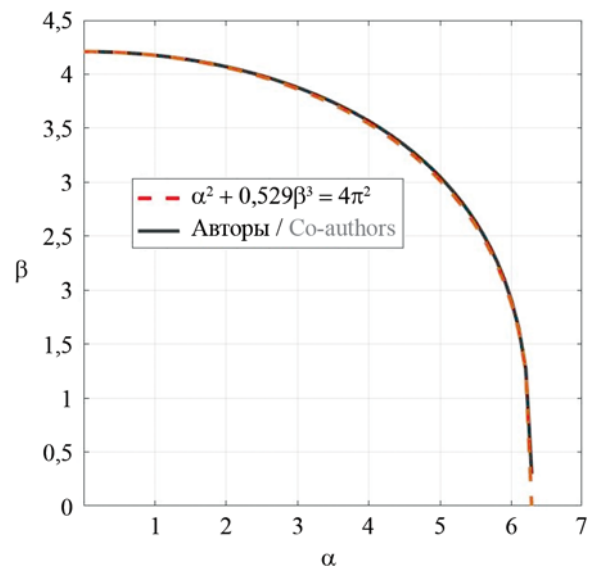


Рис. 10. Область устойчивости стержня с жестко зажатými концами
The stability domain for a rod that has rigidly clamped ends

При $\alpha = 6,283186$ и $\beta = 0$, учитывая (9), получаем формулу Ф.С. Ясинского [23]:

$$F_{кр} = \frac{4\pi^2 EI_z}{l^2}. \quad (37)$$

При $\alpha = 0$ и $\beta = 4,210175$, учитывая (9), корректируем формулу А.Н. Динника [22], у которого коэффициент 4,19:

$$l_{кр} = 4,21\sqrt{\frac{EI_z}{q}}. \quad (38)$$

Приближенная зависимость (23) в такой схеме закрепления имеет следующий вид:

$$\alpha^2 + 0,529\beta^2 = 4\pi^2$$

или, учитывая выражение (9):

$$F + 0,529ql = \frac{4\pi^2 EI_z}{l^2}. \quad (39)$$

Отметим, что значения α и β , определяемые по приближенной зависимости, также лежат внутри области устойчивости (рис. 10), а наибольший прогиб (рис. 6) при

$$0,5l < x_0 < 0,545l, \quad (40)$$

где $x_0 = 0,5l$, получится при $q = 0$, если действует только сила F , а при $x_0 = 0,545l$ получается от действия собственного веса.

Все представленные выше задачи решены также численно, в частности, методом конечных разностей. Для реализации метода сеток интервал $\xi \in [0; 1]$ разбивается на N_ξ частей с шагом $\Delta\xi$, а производные в уравнении (10) и в граничных условиях заменяются сеточными.

Задачи сводятся к системе линейных алгебраических уравнений формы:

$$([A] + \alpha^2 [B] + \beta^3 [C])\{X\} = 0, \quad (41)$$

где $\{X\} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{n-1}, v_n\}$ — вектор безразмерных перемещений узлов.

Здесь соответствующие матрицы $[A]$, $[B]$, $[C]$ имеют формы:

$$[A] = \frac{1}{\Delta\varphi^4} \begin{bmatrix} a_{22} & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & a_{nn} \end{bmatrix};$$

$$[B] = \frac{1}{\Delta\varphi^2} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C] = \frac{1}{\Delta\varphi^2} \begin{bmatrix} -2\varphi_2 & \varphi_2 + \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_3 - \frac{\Delta\varphi}{2} & -2\varphi_3 & \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_4 - \frac{\Delta\varphi}{2} & -2\varphi_4 & \varphi_4 + \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2\varphi_{n-2} & \varphi_{n-2} - \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \varphi_{n-2} - \frac{\Delta\varphi}{2} & \varphi_{n-1} - \frac{\Delta\varphi}{2} & -2\varphi_{n-1} & \varphi_n + \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \varphi_n - \frac{\Delta\varphi}{2} & -2\varphi_n & 0 \end{bmatrix},$$

где $\varphi_i = (i-1)\Delta\varphi$.

Коэффициент a_{22} в матрице $[A]$ равен 5, если верхний конец шарнирно закреплен, и 7, если он жестко зашцеplen. Аналогичным образом определяется коэффициент a_{nn} для нижнего конца.

Система (39) однородна и имеет ненулевое решение, если ее определитель равен нулю:

$$|[A] + \alpha^2 [B] + \beta^3 [C]| = 0. \quad (42)$$

Для известных α , проблема нахождения $\lambda = \beta^3$ является обобщенной проблемой собственных значений. Точно так же, зная β , несложно найти α . Расчет с численно-аналитическим решением составляет менее 0,01 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемая методика, в отличие от аналитических решений, позволяет решить задачу с произвольной фиксацией концов стержня. Также возможно учитывать изменяющуюся по длине жесткость и неоднородность стержня. Тестовые задачи показали хорошее согласие с литературными данными. В дальнейшем планируется развитие методики расчета с учетом деформаций ползучести.

Анализируя формулы (25), (32), (35), (39), сделаем вывод, что распределенная нагрузка в виде собственного веса может быть заменена эквивалентной

сосредоточенной силой на верхнем конце, которая равна определенной доле от общего веса стержня. В случае закрепления шарнир-шарнир эта доля со-

ставляет 53,2 %, а в случаях закрепления шарнир-защемление, защемление-шарнир и защемление-защемление — 38,5; 67,3 и 52,9 % соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Litvinov S.V., Klimenko E.S., Kulinich I.I., Yazyeva S.B. Longitudinal bending of polymer rods with account taken of creep strains and initial imperfections // *International Polymer Science and Technology*. 2015. Vol. 42. No 2. Pp. 23–25. DOI: 10.1177/0307174X1504200206
2. Andreev V.I., Tsybin N.Y. On the stability of rod with variable cross-section // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. Pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.033
3. Andreev V.I., Barmenkova E.V. Iterative method of optimization of stress state of column under eccentric compression // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 91. Pp. 20–25. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.005
4. Yazyev S.B., Kozelskaya M.Yu., Strelnikov G.P., Litvinov S.V. Energy method in solving the problems of stability for a viscoelastic polymer rods // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. P. 05010. DOI: 10.1051/mateconf/201712905010
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1004–1005. Pp. 257–260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.257
6. Yazyev B.M., Yazyev S.B., Grinev A.P., Britikova E.A. The Definition of a Critical Deflection of Compressed Rods with the Creep by the Method of Bubnov-Galerkin // *Material Science Forum*. 2018. Vol. 931. Pp. 127–132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.127
7. Danilova-Volkovskaya G.M., Chepurnenko A.S., Begak A., Savchenko A.A. Calculation of the bending of electromechanical aircraft element made of the carbon fiber // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012046.
8. Veremeenko A.A., Chepurnenko A.S., Shvetsov P.A., Zorchenko L.A., Yazyev S.B. Finite-element modeling of loading of spring from an orthotropic material // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90 DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012099.
9. Jan Walczak J., Sieniawski J., Bathe K. On the analysis of creep stability and rupture // *Computers & Structures*. 1983. Vol. 17. Pp. 783–792
10. Aslan T.A., Noori A.R., Temel B. Dynamic response of viscoelastic tapered cycloidal rods // *Mechanics Research Communications*. 2018. Vol. 92. Pp. 8–14. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2018.06.006
11. Chirkunov Yu.A. Non-linear longitudinal oscillations of a viscoelastic rod in Kelvin's model // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015. Vol. 79. Pp. 506–513. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.03.012
12. Eratlı N., Argeso H., Çalım F.F., Temel B., Omurtag M.H. Dynamic analysis of linear viscoelastic cylindrical and conical helicoidal rods using the mixed FEM // *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333. Pp. 3671–3690. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.03.017
13. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical simulation of nonlinear oscillations of viscoelastic pipelines conveying fluid // *Applied Mathematical Modelling*. 2016. Vol. 66. Pp. 662–679. DOI: 10.1016/j.apm.2018.10.008
14. Zhe Ding, Li Li, Jianyi Kong, Li Qin. A modal projection-based reduction method for transient dynamic responses of viscoelastic systems with multiple damping models // *Computers & Structures*. 2018. Vol. 194. Pp. 60–73. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.09.004
15. Liu Y., Wang M. A model and numerical study for coiling of Kelvin-type viscoelastic filament // *Mechanics Research Communications*. 2015. Vol. 70. Pp. 17–23. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2015.09.001
16. Lang H., Arnold M. Numerical aspects in the dynamic simulation of geometrically exact rods // *Applied Numerical Mathematics*. 2012. Vol. 62. Pp. 1411–1427. DOI: 10.1016/j.apnum.2012.06.011
17. Potapov V.D. Stability of a viscoelastic rod subject to a random stationary longitudinal force // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1992. Vol. 56. Pp. 90–95. DOI: 10.1016/0021-8928(92)90101-D
18. Potapov V.D., Marasanov A.Y. The investigation of the stability of elastic and viscoelastic rods under a stochastic excitation // *International Journal of Solids and Structures*. 1997. Vol. 34. Pp. 1367–1377. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00128-X
19. Deng J.W., Xie C., Pandey M.D. Higher-order stochastic averaging to study stability of a fractional viscoelastic column // *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333. Pp. 6121–6139. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.06.012
20. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Физматлит, 1967. 984 с.
21. Timoshenko S. Stabilitätsprobleme der Elastizität // *Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik*. Vol. 1. Leipzig, 1929. Pp. 81–145.
22. Динник А.Н. Продольный изгиб при действии собственного веса // *Известия Алексеевского Донского политехнического института*. 1912. Т. 1. С. 19–46.
23. Ясинский Ф.С. Избранные работы по устойчивости сжатых стержней. М.; Л. : Гостехиздат, 1952. 428 с.

24. Белоусов В.П. Устойчивость плоской формы изгиба стержней переменного поперечного сечения. Динамика твердого тела. Алма-Ата, 1982. С. 17–25.

25. Euler L. Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solutione problematis isoperimetrici lentissimo sensu accepti // Lausanne et Genevae. 1744. Pp. 245–250.

Поступила в редакцию 14 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2021 г.

Одобрена для публикации 21 января 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сердар Батырович Языев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162; РИНЦ ID: 976399, Scopus: 57190970024, ORCID: 0000-0002-7839-7381; russiangel@mail.ru;

Антон Сергеевич Чепурненко — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162; РИНЦ ID: 778841, Scopus: 56056531000, ResearcherID: E-4692-2017, ORCID: 0000-0002-9133-8546; anton_chepurnenk@mail.ru;

Артур Артурович Аваков — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162; РИНЦ ID: 809018, Scopus: 57190967607; streetdriving@mail.ru.

REFERENCES

1. Litvinov S.V., Klimenko E.S., Kulinich I.I., Yazyeva S.B. Longitudinal bending of polymer rods with account taken of creep strains and initial imperfections. *International Polymer Science and Technology*. 2015; 42(2):23-25. DOI: 10.1177/0307174X1504200206
2. Andreev V.I., Tsybin N.Y. On the stability of rod with variable cross-section. *Procedia Engineering*. 2015; 111:42-48. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.033
3. Andreev V.I., Barmenkova E.V. Iterative method of optimization of stress state of column under eccentric compression. *Procedia Engineering*. 2014; 91:20-25. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.005
4. Yazyev S.B., Kozelskaya M.Yu., Strelnikov G.P., Litvinov S.V. Energy method in solving the problems of stability for a viscoelastic polymer rods. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 129:05010. DOI: 10.1051/mateconf/201712905010
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 1004-1005:257-260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.257
6. Yazyev B.M., Yazyev S.B., Grinev A.P., Britikova E.A. The Definition of a Critical Deflection of Compressed Rods with the Creep by the Method of Bubnov-Galerkin. *Material Science Forum*. 2018; 931:127-132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.127.
7. Danilova-Volkovskaya G.M., Chepurnenko A.S., Begak A., Savchenko A.A. Calculation of the bending of electromechanical aircraft element made of the carbon fiber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012046
8. Veremeenko A.A., Chepurnenko A.S., Shvetsov P.A., Zorchenko L.A., Yazyev S.B. Finite-element modeling of loading of spring from an orthotropic material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012099
9. Jan Walczak J., Sieniawski J., Bathe K. On the analysis of creep stability and rupture. *Computers & Structures*. 1983; 17:783-792.
10. Aslan T.A., Noori A.R., Temel B. Dynamic response of viscoelastic tapered cycloidal rods. *Mechanics Research Communications*. 2018; 92:8-14. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2018.06.006
11. Chirkunov Yu.A. Non-linear longitudinal oscillations of a viscoelastic rod in Kelvin's model. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015; 79:506-513. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.03.012
12. Eratlı N., Argeso H., Çalım F.F., Temel B., Omurtag M.H. Dynamic analysis of linear viscoelastic cylindrical and conical helicoidal rods using the mixed FEM. *Journal of Sound and Vibration*. 2014; 333:3671-3690. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.03.017
13. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical simulation of nonlinear oscillations of viscoelastic pipelines conveying fluid. *Applied Mathematical Modelling*. 2016; 66:662-679. DOI: 10.1016/j.apm.2018.10.008
14. Zhe Ding, Li Li, Jianyi Kong, Li Qin. A modal projection-based reduction method for transient dynamic responses of viscoelastic systems with multiple damping models. *Computers & Structures*. 2018; 194:60-73. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.09.004

15. Liu Y., Wang M. A model and numerical study for coiling of Kelvin-type viscoelastic filament. *Mechanics Research Communications*. 2015; 70:17-23. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2015.09.001
16. Lang H., Arnold M. Numerical aspects in the dynamic simulation of geometrically exact rods. *Applied Numerical Mathematics*. 2012; 62:1411-1427. DOI: 10.1016/j.apnum.2012.06.011
17. Potapov V.D. Stability of a viscoelastic rod subject to a random stationary longitudinal force. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1992; 56:90-95. DOI: 10.1016/0021-8928(92)90101-D
18. Potapov V.D., Marasanov A.Y. The investigation of the stability of elastic and viscoelastic rods under a stochastic excitation. *International Journal of Solids and Structures*. 1997; 34:1367-1377. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00128-X
19. Deng J.W., Xie C., Pandey M.D. Higher-order stochastic averaging to study stability of a fractional viscoelastic column. *Journal of Sound and Vibration*. 2014; 333:6121-6139. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.06.012
20. Volmir A.S. *Stability of deformable systems*. Moscow, Fizmatlit, 1967; 984. (rus.).
21. Timoshenko S. Stabilitätsprobleme der Elastizität. *Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik*. Vol. 1. Leipzig, 1929; 81-145. (ger.).
22. Dinnik A.N. Buckling under the action of its own weight. *Izvestia of the Alekseevsk Don Polytechnic Institute*. 1912; 1:19-46. (rus.).
23. Yasinsky F.S. *Selected works on the stability of compressed rods*. Moscow-Leningrad, Gostekhizdat, 1952; 428. (rus.).
24. Belousov V.P. *Stability of the plane bending of the rods of variable transverse section*. Dynamics of a rigid body. Alma-Ata, 1982; 17-25. (rus.).
25. Euler L. Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solution problematic isoperimetric lentissimo sensu accept. *Lausanne et Genevae*. 1744; 245-250.

Received December 14, 2020.

Adopted in revised form on January 20, 2021.

Approved for publication on January 21, 2021.

B I O N O T E S: **Serdar B. Yazyev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics; **Don State Technical University (DSTU)**; 162 Socialisticheskaya st., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation; ID RISC: 976399, Scopus: 57190970024, ORCID: 0000-0002-7839-7381; russiangel@mail.ru;

Anton S. Chepurnenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Don State Technical University (DSTU)**; 162 Socialisticheskaya st., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation; ID RISC: 778841, Scopus: 56056531000, ResearcherID: E-4692-2017, ORCID: 0000-0002-9133-8546; anton_chepurnenk@mail.ru;

Arthur A. Avakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Don State Technical University (DSTU)**; 162 Socialisticheskaya st., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation; ID RISC: 809018, Scopus: 57190967607; streetdriving@mail.ru.

Учет ударного воздействия при движении поездов метрополитена в расчете компонентов напряженно-деформированного состояния на контуре тоннельной обделки

В.А. Митрошин, В.Л. Мондрус

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Расширение городских территорий, уплотнение городской среды приводят к необходимости обеспечения бесперебойного транспортного сообщения между районами. Метрополитен — современный вид транспорта, строительство и эксплуатация которого возможны под землей. Метрополитен является и источником повышенных вибраций, которые негативно сказываются на комфорте жизни людей и высокотехнологичных производственных процессах. Основное влияние на уровень вибрации на поверхности грунта или строительных конструкциях оказывают скорость поезда, его вес, количество дефектов на колесах и рельсах, геологическое строение площадки, условия заложения трассы метрополитена, удаленность точек монтажа измерительного оборудования. Рассмотрено воздействие движущихся поездов метрополитена на тоннельную обделку, а также наезд колеса на стык рельсовых плетей.

Материалы и методы. В основе решения задачи о нахождении напряжений на границе тоннельной обделки от подвижного состава метрополитена при ударе на стыке рельсов лежит известная задача расчета балки на упругом основании. Аналитическое решение и графики получены при помощи программного комплекса MathCAD.

Результаты. Решена задача о нахождении напряжений на границе тоннельной обделки от подвижного состава метрополитена при ударе на стыке рельсов. Построены графики прогибов изогнутой оси бесконечной балки, изгибающих моментов, а также напряжений на контуре тоннельной обделки. Получены нормальные напряжения на контуре тоннеля с помощью разложения внешней нагрузки в ряды Фурье.

Выводы. Полученные в результате расчета данные используются в дальнейшем в задачах нахождения волнового поля в сплошной упругой среде с помощью методов последовательных волновых приближений и компенсирующих нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, вибрация, волновое поле, колебания, грунтовый массив, распространение колебаний, ударное взаимодействие, стык рельсов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Митрошин В.А., Мондрус В.Л. Учет ударного воздействия при движении поездов метрополитена в расчете компонентов напряженно-деформированного состояния на контуре тоннельной обделки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 41–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48

The impact effect of underground trains in motion analyzed together with other factors contributing to the stress-strain state arising along the tunnel lining boundary

Vasiliy A. Mitroshin, Vladimir L. Mondrus

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

ABSTRACT

Introduction. Urban expansion and compaction of urban environments trigger the need for delay-free transport communications between urban districts. An underground railway is a modern means of transport, whose construction and operation are feasible below the ground surface. However, it is a source of vibrations that negatively affect human comfort and high-tech production processes. Train speed, weight, wheel and rail defects, the geological structure of the site, subway route construction conditions, the remoteness of measuring equipment installation points are the main factors that influence the intensity of vibrations of the ground surface or building structures. The effect, produced by moving subway trains on the tunnel lining, as well as the wheel-rail junction interface are analyzed in this work.

Materials and methods. The problem of stresses, triggered by underground trains along the boundary of the tunnel lining, can be reduced to the well-known problem of a beam on an elastic foundation. MathCAD software package was used to obtain the analytical solution and diagrams.

Results. The co-authors identified the values of stresses arising along the boundary of the tunnel lining as a result of the interface between underground trains and rail junctions. Diagrams that illustrate deflections of a bending curve of an infinite beam, bending moments, and stresses arising along the boundary of the tunnel lining have been made. Values of regular stresses arising along the tunnel boundary are obtained by transforming external loads into Fourier series.

Conclusions. The data obtained as a result of the analysis are further used to solve problems of identifying the wave field in a continuous elastic medium using methods of successive wave approximations and compensating loads.

KEYWORDS: underground, vibration, wave field, oscillations, soil body, vibration propagation, impact interaction, rail joint

FOR CITATION: Mitroshin V.A., Mondrus V.L. The impact effect of underground trains in motion analyzed together with other factors contributing to the stress-strain state arising along the tunnel lining boundary. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):41-48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация, увеличение крупных городов и уплотнение городской среды вызывают необходимость обеспечения бесперебойного транспортного сообщения. Развитие наземной транспортной сети имеет свои пределы, и в условиях плотной городской застройки ее расширение может оказаться невозможным, особенно для центральных, исторических, частей городов. В такой ситуации единственным современным видом транспорта, строительство и эксплуатация которого возможны под землей, является метрополитен.

Наряду со всеми удобствами использования подземки, имеется ряд отрицательных факторов. Поезда метрополитена во время движения создают шум и вибрацию, что может негативно влиять на расположенные вблизи от линии жилые массивы или производственные комплексы. Метрополитен создает колебания не постоянно, а с некоторой периодичностью, зависящей от времени суток (в часы пик загруженность выше и степень колебаний выше), при этом основное влияние на измеряемый уровень вибрации на поверхности грунта или строительных конструкциях оказывают скорость поезда, его вес, количество дефектов на колесах и рельсах, геологическое строение площадки, условия заложения трассы метрополитена, удаленность точек монтажа измерительного оборудования. Нормативной документацией установлена санитарная зона метрополитена (45 м от тоннеля в обе стороны), в которой должны выполняться требования по ограничению шума и вибрации [1–3]. Современные производственные процессы или оборудование научно-исследовательских центров крайне чувствительны к внешним воздействиям [4, 5], поэтому задача прогноза уровня вибраций на стадии проектирования линии метрополитена либо зданий и сооружений вблизи подземки представляется достаточно значимой [6]. Кроме того, следует упомянуть также ситуации, когда тоннель мелкого заложения располагается рядом с объектами культурного наследия. Распространяющиеся от поездов метрополитена колебания, очевидно, разрушить памятник архитектуры не в состоянии, однако навредить элементам здания, составляющим предмет охраны, например, лепнине, вполне способны [7–9].

В отечественной и зарубежной научной литературе вопросам изучения взаимодействия подвижного состава с основанием, а также дальнейшему

распространению колебаний в грунтовом массиве посвящено много работ. Особое место среди них занимает труд М.А. Дашевского [10], где представлен большой объем экспериментальных данных по измерению вибрации как непосредственно в тоннеле, так и на различных этажах близлежащих строений во время прохождения поезда, и который также использован в данном исследовании. Метод нахождения волновых полей в грунтовом массиве, предложенный М.А. Дашевским [10], впоследствии послужил базой для множества научных работ [11–13]. Комбинация методов последовательных волновых приближений и компенсационных нагрузок позволяет путем решения нескольких ключевых задач в плоской постановке перейти от распространения волнового поля в неограниченной плоскости к полуплоскости, имитирующей поверхность земли. В публикации [13] реализована методика определения волновых полей в грунтовом массиве при движении поездов метрополитена в круглых тоннелях для плоских расчетных схем. Нагрузка на тоннель представлена в виде периодически повторяющихся гармонических сил. В работе [11] рассмотрены изгибные и продольные колебания свайного фундамента при воздействии плоских волн от метрополитена, получены соответствующие аналитические решения задач. Изучению волновых полей от поездов (как подземных, так и наземных) посвящен ряд трудов иностранных ученых [14–20].

Поскольку метрополитен является сложной подвижной механической системой, то каждый из ее компонентов оказывает существенное влияние на волновые процессы, происходящие в грунтовом массиве при прохождении поезда через исследуемый створ. Упрощенно эту систему можно представить в виде взаимодействия следующих частей: подвижной состав – рельсы – балласт – тоннельная обделка – грунт. В ряде работ для описания таких волновых процессов используется более простой подход, при котором воздействие на тоннельную обделку усредняется и повторяется с определенной периодичностью [10, 13]. Для оценки влияния скорости передвижения точечной нагрузки от колесных пар вагонов на уровни вызываемых вибраций, тоннель представляется в виде балки постоянного сечения на упруго-вязком основании [21]. Скорость поезда последовательно принималась равной 10, 20 и 30 м/с. Полученные в результате расчетов наибольшие уровни виброскоростей и виброускорений тоннельной обделки соответствуют скорости состава

ва 30 м/с. Для максимальной скорости движения поезда на перегоне, обычно не превышающей 80 км/ч (22,2 м/с), рассчитанный уровень вибрации поверхности тоннеля равен 62 дБ. Реальные измерения вибрации на поверхности грунта, хотя и выполнены в других условиях, отличаются в большую сторону в среднем на 30 %, а с увеличением расстояния до наблюдателя, как известно, колебания в грунте затухают. Таким образом, представление тоннеля в виде балки на упруго-вязком основании, нагруженной сосредоточенными силами от колесных пар вагонов, позволяет лишь предварительно с некоторой погрешностью оценить уровни вибрации тоннельной обделки. В публикации [22] с помощью численного моделирования рассмотрены вопросы распространения вибраций в грунтовом массиве от ударов при взаимодействии поврежденных колес и рельсов с дефектами различных типов, в том числе и стык рельсов с разрывом. Подвижной состав, рельсовое полотно, балласт моделируются в виде сложной взаимодействующей многомассовой системы, расположенной на упругом основании. Для верификации модели были выполнены измерения вибрации поверхности грунта от проходящего поезда на расстоянии 12 м от колеи. Показано, что любое соединение рельсов с искусственными неровностями при прохождении поезда приводит к скачкообразному возрастанию уровней виброускорений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим подробнее воздействие подвижного состава с принятыми упрощениями на тоннельную обделку (рис. 1). Стандартная длина вагона 19 м. Между осями тележек расстояние — 12,6 м, между колесными парами — 2,1 м.

Вдоль оси тоннеля нагрузка принимается периодической с периодом, равным расстоянию между тележками. От каждой колесной пары на рельсовое полотно действует сосредоточенная квазистатическая сила P_{vert} (рис. 2). В соответствии с работой [10] нагрузка распределяется на три шпалы и для упрощения расчета без ущерба для точности можно принять, что на тоннель действует равномерно распределенная нагрузка шириной тележки, а на остальных участках она отсутствует.

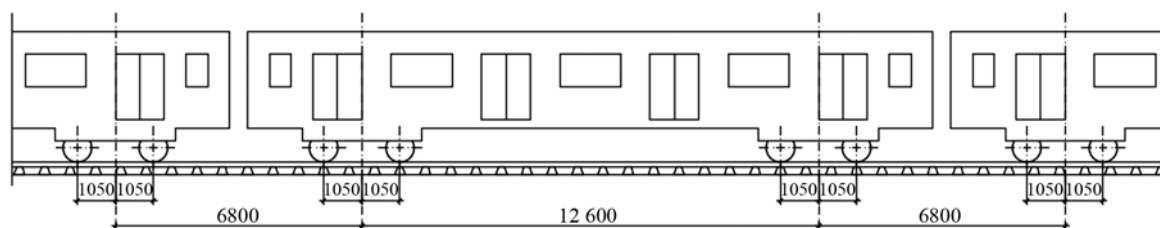


Рис. 1. Схематическое изображение части состава метрополитена

Fig. 1. Schematic representation of a part of an underground train

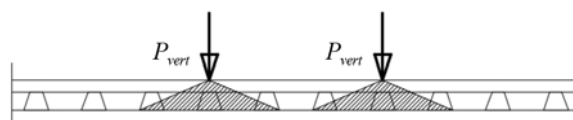


Рис. 2. Схема распределения нагрузки на три шпалы

Fig. 2. Load distribution over three railway sleepers

Определенный научный интерес представляет более детальное изучение внешнего воздействия от подвижного состава, а именно учет дефектов, которые имеются на колесах и рельсах, а также наезд колеса на разрыв рельсовых плетей. Рельсовые стыки находятся на расстоянии примерно 600 м друг от друга, а также обязательно на границах станции — так называемые электроизолирующие стыки (схематическое изображение представлено на рис. 3).

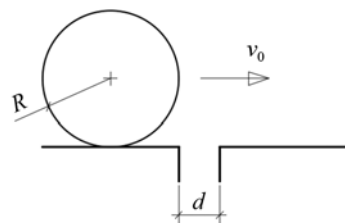


Рис. 3. Схематическое изображение стыка рельсовых плетей

Fig. 3. Schematic representation of a rail junction

При прохождении поездом такого стыка совершается удар, так как колесные пары первого вагона накатываются на принимающий рельс со скоростью около 60 км/ч. Далее скорость постепенно снижается, и вклад ударного воздействия в общий вибрационный фон становится меньше. В труде [23] выполнены натурные исследования поверхности земли над Замоскворецкой линией метрополитена мелкого заложения в районе станций Беломорская и Ховрино. С помощью четырехканального виброметра в период наиболее интенсивного движения поездов обследованы пять точек вдоль трассы. Каждое измерение продолжалось не менее 12 мин. Прибор записывал регистрируемые колебания поверх-

ности грунта отдельно по каждому каналу. Затем с помощью специального программного обеспечения массив измерений был преобразован в графики вертикальных и двух горизонтальных составляющих виброускорений. Полученные экспериментальные данные сведены в таблицу и проанализированы. Отмечено, что в двух исследованных точках в начале и в конце станции уровни виброускорений значительно выше, чем в точках, расположенных над перегонном. Этот факт служит подтверждением вклада удара, совершаемого колесами состава, на стыке рельсов в общий вибрационный фон при въезде (максимум для первого вагона) и выезде (максимум для последнего вагона).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задач о нахождении волнового поля в сплошной упругой среде при движении поезда вдоль цилиндрической полости следует ввести ряд упрощений. Представим тоннель с рельсами и подрельсовым основанием в виде балки бесконечной длины, лежащей на упругом основании. При движении по прямому участку без учета дефектов и стыков нагрузка от поезда может быть принята распределенной как [10], а в момент наезда колеса на стык к ней добавляется ударная составляющая. Динамическая сила воздействия колеса на рельс может быть определена по методике, изложенной в статье [24], а дифференциальное уравнение изогнутой оси балки, нагруженной ударной силой, имеет вид:

$$EIy^{IV}(x) + 4ky(x) = \delta(x)P, \quad (1)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция, коэффициент $k = \frac{E_{\text{осн}}}{1-\mu^2}$; $E_{\text{осн}}$ — модуль упругости подрельсового основания; μ — коэффициент Пуассона.

Решив уравнение (2), построим график прогибов бесконечной балки на промежутке $[0; L]$, где L — расстояние до следующей колесной пары (рис. 4), а также график распределения изгибающих моментов (рис. 5) и нормальных напряжений (рис. 6).

В плоскости поперечного сечения тоннеля вертикальная нагрузка от поезда на тоннельную обделку с определенными упрощениями может быть представлена в виде пары сосредоточенных сил, приложенных к головке рельса. Частный случай такого нагружения (пара вертикальных сил) показан на рис. 7.

Эта нагрузка усредняется и приводится к нормальным и касательным напряжениям на контуре тоннеля с помощью разложения в ряды Фурье [10, 13].

Например, для нормальных напряжений на контуре тоннельной обделки можно записать следующее разложение нагрузки в ряд Фурье по угловой координате θ :

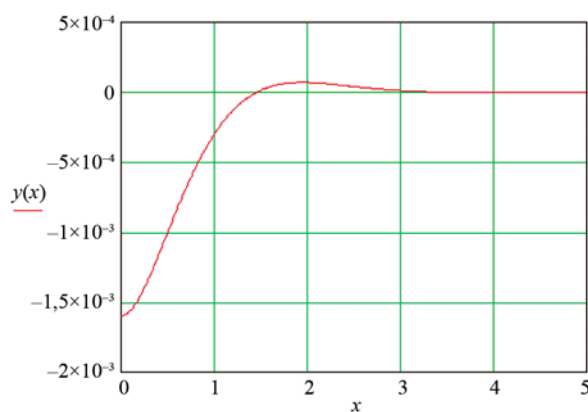


Рис. 4. Прогибы справа от оси симметрии балки в результате воздействия на стык ударной силы

Fig. 4. Deflections arising to the right of the beam axis of symmetry as a result of an impact force applied to the joint

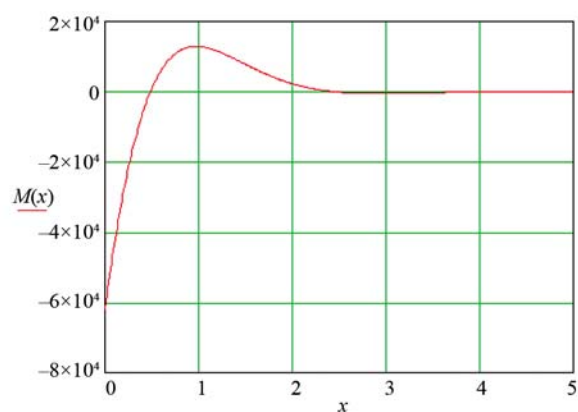


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов справа от оси симметрии балки от ударной силы

Fig. 5. Diagram of bending moments arising to the right of the beam symmetry axis as a result of an impact force

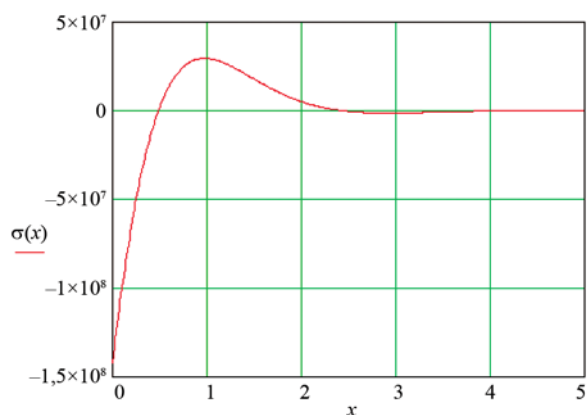


Рис. 6. Нормальные напряжения справа от оси симметрии балки в результате воздействия на стык ударной силы

Fig. 6. Regular stresses arising to the right of the beam symmetry axis as a result of an impact force applied to the joint

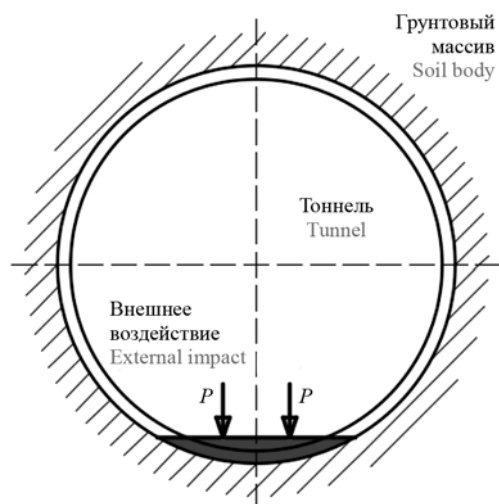


Рис. 7. Схема приложения вертикальной нагрузки

Fig. 7. Vertical load application diagram

$$\sigma(\theta) = \frac{P}{b} \cos \theta = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta), \quad (2)$$

где коэффициенты Фурье a_0 , a_n , b_n определяются следующим образом:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int \frac{P}{b} \cos \theta d\theta = \frac{P}{\pi b} \int \cos \theta d\theta = \frac{P}{\pi b} \sin \theta;$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int \frac{P}{b} \cos \theta \cos n\theta d\theta = \frac{P}{\pi b} \left(\frac{\sin(n+1)\theta}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\theta}{n-1} \right);$$

$$b_n = 0.$$

Аналогично может быть получено разложение внешней сосредоточенной нагрузки в ряд Фурье для получения касательных напряжений на тоннельной обделке. График зависимости напряжений от угловой координаты приведен на рис. 8.

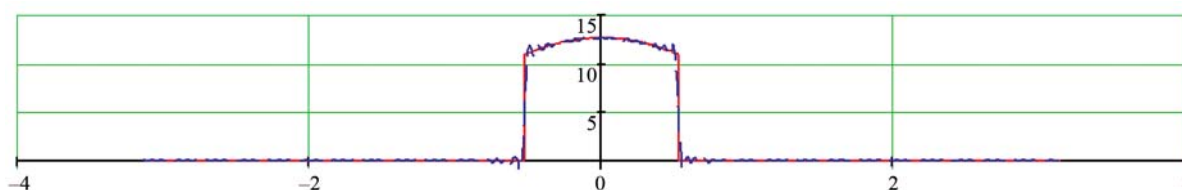


Рис. 8. Нормальные напряжения на контуре тоннеля

Fig. 8. Regular stresses arising along the tunnel boundary

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решена задача о нахождении напряжений на границе тоннельной обделки от подвижного состава метрополитена при ударе на стыке рельсов. Построены графики прогибов изогнутой оси бесконечной балки, изгибающих моментов, а также напряжений на контуре тоннельной обделки.

Вычислены нормальные напряжения на контуре тоннеля с помощью разложения внешней нагрузки в ряды Фурье. Полученные в результате расчета данные используются в дальнейшем в задачах нахождения волнового поля в сплошной упругой среде с помощью методов последовательных волновых приближений и компенсирующих нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дашевский М.А., Моторин В.В. Эффективная конструкция виброзащитного верхнего строения пути метрополитена // Метро и тоннели. 2015. № 2. С. 28–33.
2. Курбацкий Е.Н., Елгаев В.С. Воздействие на здания при проходке тоннелей // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 2 (40). С. 162–167.
3. Sica G. Groundborne vibrations caused by railway construction and operation in buildings: design, implementation and analysis of measurement for assessment of human exposure : PhD thesis. University of Salford, United Kingdom, 2014. 322 p.
4. Смирнов В.А. Методы размещения высокоточного оборудования в существующих зданиях // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 76–77.
5. Мондрус В.Л., Смирнов В.А. Численное моделирование нелинейной системы виброзащиты трансмиссионного электронного микроскопа // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 3. С. 125–128.
6. Дашевский М.А., Мондрус В.Л. Прогноз уровней вибрации зданий от движения поездов метрополитена // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 52–54.

7. Дашевский М.А., Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Шутковский С.Н. Особенности устройства системы виброзащиты в существующих зданиях бывшей городской усадьбы XVIII–XIX вв., входящих в комплекс зданий ГМИИ им А.С. Пушкина // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 251–253.
8. Vogiatzis K. Protection of the cultural heritage from underground Metro vibration & ground borne noise in Athens centre: The case of Kerameikos Archaeological Museum & Gazi Cultural centre // The International Journal of Acoustics and Vibration. 2012. Vol. 17. Issue 2. DOI: 10.20855/ijav.2012.17.2301
9. Vogiatzis K.E., Kouroussis G. Prediction and efficient control of vibration mitigation using floating slabs: Practical application at Athens metro lines 2 and 3 // International Journal of Rail Transportation. 2015. Vol. 3. Issue 4. Pp. 215–232. DOI: 10.1080/23248378.2015.1076622
10. Дашевский М.А. Защита зданий от вибраций, возбуждаемых движением поездов метрополитена : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1991. 456 с.
11. Глазков Д.А. Воздействие волновых полей техногенного происхождения на свайные фундаменты зданий и сооружений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 113 с.
12. Антонов Н.А. Экспериментально-теоретическое исследование колебаний поверхности грунта при движении поездов метрополитена в тоннелях неглубокого заложения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 168 с.
13. Колотовичев Ю.А. Задачи прогноза колебаний поверхности грунта при движении поездов метрополитена в тоннелях неглубокого заложения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 24 с.
14. Kouroussis G., Alexandrou G., Connolly D.P., Vogiatzis K., Verlinden O. Railway-induced ground vibrations in the presence of local track irregularities and wheel flats // Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2015). 2015. DOI: 10.7712/120115.3378.582
15. Kouroussis G., Connolly D.P., Alexandrou G., Vogiatzis K. Railway ground vibrations induced by wheel and rail singular defects // Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53. Issue 10. Pp. 1500–1519. DOI: 10.1080/00423114.2015.1062116
16. Thompson D.J., Kouroussis G., Ntotsios E. Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles // Vehicle System Dynamics. 2019. Vol. 57. Issue 7. Pp. 936–983. DOI: 10.1080/00423114.2019.1602274
17. Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O. Railway-induced ground vibrations — a review of vehicle effects // International Journal of Rail Transportation. 2014. Vol. 2. Issue 2. Pp. 69–110. DOI: 10.1080/23248378.2014.897791
18. Kouroussis G., Florentin J., Verlinden O. Ground vibrations induced by InterCity/InterRegion trains: A numerical prediction based on the multibody/finite element modeling approach // Journal of Vibration and Control. 2016. Vol. 22. Issue 20. Pp. 4192–4210. DOI: 10.1177/1077546315573914
19. Bhore C.V., Andhare A.B., Padole P.M., Korde M.D. Analysis of track vibration for metro rail // Advances in Mechanical Engineering. 2020. Pp. 67–73. DOI: 10.1007/978-981-15-3639-7_9
20. Vedala R.S., Reddy V. Analysis of ground vibrations due to metro trains by numerical modelling // Proceedings Volume of National Conference Advanced Trends in Civil Engineering & Sustainable Development. 2016. Pp. 44–51.
21. Курбацкий Е.Н., Нгуен Ч.Т. Оценка вибрации тоннеля при движении сосредоточенных сил // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. № 2 (8). С. 38–42.
22. Kouroussis G., Connolly D., Alexandrou G., Vogiatzis K., Verlinden O. Modelling the singular rail and wheel surface defect for predicting railway ground vibration // Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration. 2015.
23. Mitroshin V., Mondrus V., Sizov D. Analysis of ground vibrations caused by the shallow subway // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012022
24. Коган А.Я., Пейч Ю.Л. Расчет нестационарного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 2. С. 31–39.

Поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2021 г.

Одобрена для публикации 19 января 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Василий Александрович Митрошин** — аспирант кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 971672, ORCID: 0000-0003-4776-5118; mitroshin.vasilyi@yandex.ru;

Владимир Львович Мондрус — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 387581; mondrus@mail.ru.

REFERENCES

1. Dashevskij M., Motorin V. The effective anti-vibration underground railway superstructure. *Metro and Tunnels*. 2015; 2:28-33. (rus.).
2. Kurbatsky E.N., Elgaev V.S. Impact on the buildings during tunnel boring. *World of Transport and Transportation*. 2012; 10:2(40):162-167. (rus.).
3. Sica G. *Groundborne vibrations caused by railway construction and operation in buildings: design, implementation and analysis of measurement for assessment of human exposure : PhD thesis*. University of Salford, United Kingdom, 2014; 322.
4. Smirnov V.A. Methods for placing precision equipment in existing buildings. *Housing Construction*. 2012; 6:76-77. (rus.).
5. Mondrus V.L., Smirnov V.A. Numerical analysis of nonlinear vibration isolation system for electron microscope. *Academia. Architecture and Construction*. 2012; 3:125-128. (rus.).
6. Dashevskij M.A., Mondrus V.L. Prognosis of vibration levels of buildings from underground train traffic. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 11:52-54. (rus.).
7. Dashevskij M.A., Mondrus V.L., Sizov D.K., Shutovskii S.N. Features of the device vibration protection in existing buildings former city manor XVIII-XIX centuries, included in the complex of buildings of the state museum of A.S. Pushkina. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2013; 6:251-253. (rus.).
8. Vogiatzis K. Protection of the cultural heritage from underground Metro vibration & ground borne noise in Athens centre: The case of Kerameikos Archaeological Museum & Gazi Cultural centre. *The International Journal of Acoustics and Vibration*. 2012; 17(2). DOI: 10.20855/ijav.2012.17.2301
9. Vogiatzis K.E., Kouroussis G. Prediction and efficient control of vibration mitigation using floating slabs: Practical application at Athens metro lines 2 and 3. *International Journal of Rail Transportation*. 2015; 3(4):215-232. DOI: 10.1080/23248378.2015.1076622
10. Dashevskij M.A. *Protection of buildings from vibrations generated by the movement of subway trains : dissertation ... doctors of technical sciences*. Moscow, 1991; 456. (rus.).
11. Glazkov D.A. *Impact of man-made wave fields on pile foundations of buildings and structures : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2006; 113. (rus.).
12. Antonov N.A. *Experimental and theoretical study of ground surface vibrations during the movement of subway trains in shallow tunnels : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2006; 168. (rus.).
13. Kolotovichev Yu.A. *Problems of predicting the vibrations of the soil surface during the movement of subway trains in shallow tunnels : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2006; 24. (rus.).
14. Kouroussis G., Alexandrou G., Connolly D.P., Vogiatzis K., Verlinden O. Railway-induced ground vibrations in the presence of local track irregularities and wheel flats. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2015)*. 2015. DOI: 10.7712/120115.3378.582
15. Kouroussis G., Connolly D.P., Alexandrou G., Vogiatzis K. Railway ground vibrations induced by wheel and rail singular defects. *Vehicle System Dynamics*. 2015; 53(10):1500-1519. DOI: 10.1080/00423114.2015.1062116
16. Thompson D.J., Kouroussis G., Ntotsios E. Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 2019; 57(7):936-983. DOI: 10.1080/00423114.2019.1602274
17. Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O. Railway-induced ground vibrations — a review of vehicle effects. *International Journal of Rail Transportation*. 2014; 2(2):69-110. DOI: 10.1080/23248378.2014.897791
18. Kouroussis G., Florentin J., Verlinden O. Ground vibrations induced by InterCity/InterRegion trains: A numerical prediction based on the multibody/finite element modeling approach. *Journal of Vibration and Control*. 2016; 22(20):4192-4210. DOI: 10.1177/1077546315573914
19. Bhore C.V., Andhare A.B., Padole P.M., Korde M.D. Analysis of track vibration for metro rail. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020; 67-73. DOI: 10.1007/978-981-15-3639-7_9
20. Vedala R.S., Reddy V. Analysis of ground vibrations due to metro trains by numerical modelling. *Proceedings Volume of National Conference Advanced Trends in Civil Engineering & Sustainable Development*. 2016; 44-51.
21. Kurbatskiy Ye.N., Nguyen Ch.T. Evaluation of the vibration of the tunnel when moving concentrated forces. *Caspian Engineering and Construction Bulletin*. 2014; 2(8):38-42. (rus.).
22. Kouroussis G., Connolly D., Alexandrou G., Vogiatzis K., Verlinden O. Modelling the singular rail and wheel surface defect for predicting railway ground vibration. *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*. 2015.

23. Mitroshin V., Mondrus V., Sizov D. Analysis of ground vibrations caused by the shallow subway. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012022. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012022

24. Kogan A.Ya., Peych Yu.L. Calculation of non-stationary stress-deformed state of elements of track structure in the zone of rail joint. *VNIIZHT Scientific Journal*. 2002; 2:31-39. (rus.).

Received December 28, 2020.

Adopted in revised form on January 19, 2021.

Approved for publication on January 19, 2021.

B I O N O T E S: **Vasiliy A. Mitroshin** — postgraduate of the Department of Theoretical and Structural Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 971672, ORCID: 0000-0003-4776-5118; mitroshin.vasily@yandex.ru;

Vladimir L. Mondrus — Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Theoretical and Structural Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 387581; mondrus@mail.ru.

Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига

С.Ю. Савин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При построении расчетных схем железобетонных несущих систем зданий и сооружений с использованием стержневой или пластинчатой аналогии между конструктивными элементами и их моделями, как правило, подразумевается абсолютно жесткое сцепление арматуры с бетоном, что не в полной мере отражает характер их действительной совместной работы на участках с высоким градиентом напряжений, например, в узлах сопряжения колонны с ригелем. В связи с этим существует потребность в построении расчетных зависимостей и методики для анализа устойчивости деформированного состояния стержневых элементов железобетонных каркасов зданий и сооружений с учетом деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона.

Материалы и методы. Для построения деформационной модели внецентренно сжатого железобетонного стержневого элемента применена теория составных стержней А.Р. Ржаницына. В качестве деформационной реологической модели статико-динамического сопротивления бетона предлагается использовать модель Кельвина – Фойгта.

Результаты. В аналитическом виде построены зависимости для расчета деформированного состояния и устойчивости железобетонного внецентренно сжатого стержневого элемента при его динамическом догружении, учитывающие деформации сдвига в зоне контакта арматурных стержней и бетона. С целью учета упругопластического характера деформирования бетона и стальной арматуры при решении задачи об устойчивости динамически догружаемого железобетонного внецентренно сжатого стержневого элемента каркаса здания был разработан алгоритм нелинейного расчета.

Выводы. Полученные расчетные зависимости для учета деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона во внецентренно сжатых железобетонных стержневых элементах каркасов зданий и сооружений позволяют выполнить расчет устойчивости деформированного состояния таких элементов при особых воздействиях, вызванных внезапным удалением одного из несущих элементов конструктивной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, устойчивость, сцепление арматуры с бетоном, деформации сдвига, особое предельное состояние

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Савин С.Ю. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 49–58. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58

Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special impacts with account taken of shear deformations

Sergey Yu. Savin

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

ABSTRACT

Introduction. When structural models of reinforced concrete frameworks of buildings and structures are designed, bars and plates simulate structural elements. As rule, such an approach entails rigid cohesion between reinforcement bars and concrete; thus, it fails to simulate the true nature of their joint action in the areas having high stress gradients, for example, beam-column junctions. In this regard, it's necessary to plot analytical dependencies and develop a methodology for the stability analysis of the strain state of bar elements of reinforced concrete frameworks of buildings and structures with account taken of shear deformations at the interface between a reinforcement bar and concrete.

Materials and methods. The Rzhantsyn composite bar theory was applied to design a stress-strain model of an eccentrically compressed reinforced concrete bar. The Kelvin-Voigt model is proposed as a rheological stress-strain model of static and dynamic resistance of concrete.

Results. Analytical dependencies needed to analyze the stress-strain state and stability of an eccentrically compressed reinforced concrete bar exposed to dynamic loading, were plotted. These dependencies take account of shear deformations at the interface between reinforcement bars and concrete. A nonlinear calculation algorithm was developed; it took account of the elastoplastic behavior of concrete and steel bars, when the stability problem of an eccentrically compressed dynamically loaded reinforced concrete bar was solved.

Conclusions. Analytical dependencies, obtained by the author, allow to take account of shear deformations at the interface between reinforcement bars and concrete in eccentrically compressed reinforced concrete elements of frameworks of buildings and structures for the purpose of analyzing the stability of such elements exposed to special impacts caused by the unexpected failure of one bearing element of a structural system.

KEYWORDS: reinforced concrete, stability, cohesion between reinforcement bars and concrete, shear deformation, special limit state

FOR CITATION: Savin S.Yu. Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special impacts with account taken of shear deformations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):49-58. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Анализ аварийных ситуаций с объектами капитального строительства [1–3], произошедших в последние десятилетия, таких как обрушение здания отеля Hotel New World (1986, г. Сингапур), торгового центра «Сампун» (1995, г. Сеул, Республика Корея), обрушение Басманного рынка (2006, г. Москва, Россия), восьмиэтажного здания Рана Плаза (2013, г. Савар, Бангладеш), торгового центра Maxima (2013, г. Рига, Латвия), здание Synagogue Church of all Nations (2014, штат Лагос, Нигерия), Xinjia Express Hotel (2020, г. Цюаньчжоу, провинция Фуцзянь, КНР) и др., показывает, что разрушения железобетонных конструкций несущих систем зданий и сооружений во многих случаях происходят по истечении нескольких лет, а в отдельных случаях — десятилетий с момента завершения их возведения и ввода в эксплуатацию. Обрушение эксплуатируемых зданий представляет наибольшую опасность, поскольку приводит к катастрофическим последствиям: большому числу человеческих жертв и значительному материальному ущербу. Применительно к железобетонным каркасам зданий и сооружений нормального и повышенного уровня ответственности, согласно ГОСТ 27751-2014¹, для снижения риска обрушения после внезапного удаления одного из элементов несущей системы вследствие воздействия неуставленной природы в рамках принятого в нормативных документах^{2, 3} ситуационного подхода, на стадии расчетного обоснования принятых проектных решений по защите от прогрессирующего разрушения необходимо учитывать не только физическую нелинейность материалов и геометрическую нелинейность элементов при их кратковременном нагружении, но также и деформации ползучести, средовые или механические повреждения [4], накапливаемые при эксплуатации.

¹ ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М. : ОАО «НИЦ «Строительство», 2019.

² Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03). Washington, DC : Department of Defence (DoD), 2009.

³ General Services Administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. Washington, DC : Office of Chief Architects, 2013.

Перечисленные факторы силового и средового сопротивления железобетона приводят к изменению жесткостей элементов несущей системы и, как следствие, перераспределению в них усилий, т.е. изменению расчетной схемы сооружения [5].

Следует также обратить внимание на то, что при моделировании элементов несущих систем зданий и сооружений конструкторами-проектировщиками обычно используются стержневые или пластинчатые аналогии, которые, как правило, подразумевают абсолютно жесткое сцепление арматуры с бетоном, что не в полной мере отражает характер их действительной совместной работы на участках с высоким градиентом напряжений, например, в узлах сопряжения колонны с ригелем [6].

Выполненные различными авторами экспериментальные исследования сцепления арматуры с бетоном [6–9] показали, что на сцепление влияет ряд показателей: сопротивление бетона осевому растяжению, вид поверхности арматуры и ее диаметр, наличие или отсутствие предварительного напряжения и др. В работах [9, 10] при динамическом нагружении железобетонного элемента наблюдалось увеличение сопротивления сцепления арматуры с бетоном более чем в 1,3 раза при скорости нагружения 1 Н/мм²·мс по сравнению с монотонным квазистатическим нагружением. При этом в железобетонных элементах, подверженных длительному действию факторов силового и средового воздействия, сцепление может снижаться во времени в связи с изменением напряженно-деформированного состояния элементов, прочностных и деформационных характеристик бетонной матрицы [11, 12].

Анализ научных публикаций по вопросу моделирования сцепления арматуры с бетоном в изгибаемых и внецентренно сжатых элементах железобетонных конструкций позволил выявить два основных направления решения деформационных задач и задач об устойчивости. Первое направление связано с выполнением конечно-элементного анализа с использованием моделей, состоящих из 3D-элементов, моделирующих бетон, и 2D-элементов арматурных стержней. Взаимодействие бетона и арматуры при этом задается через специальные элементы упругоподатливых связей нулевой длины. Для учета повышенной деформативности на участках с трещинами задаются коэффициенты передачи усилий сдвига для раскрытых и сомкнутых трещин. Значения этих

коэффициентов варьируются от 0 (при полном отсутствии сцепления) до 1 (при отсутствии сдвигов в узлах). Описанные конечно-элементные модели (КЭМ) преимущественно применяются для уточнения механизмов разрушения и параметров контактного взаимодействия арматуры с бетоном: коэффициентов передачи усилий сдвига для раскрытых и сомкнутых трещин; коэффициентов, учитывающих коррозионное повреждение стальной арматуры и т.д. Объектами моделирования при этом, как правило, выступают узлы сопряжения ригелей и колонн (см., например, [6, 7, 13–15]), отдельные конструктивные элементы [11, 16] или типовые подконструкции [17]. Преимуществом указанного подхода является возможность достичь высокой сходимости результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Однако применение такого подхода к расчетному анализу всего сооружения представляется крайне трудоемкой задачей, примеры решения которой, по-видимому, отсутствуют в научной литературе.

В основе второго подхода к учету влияния сдвигов на деформирование конструктивных элементов лежат теории стержней Энгессера [18], Харингса [19, 20] и А.Р. Ржаницына [21]. В работах [18–20] исследовано влияние сдвиговой жесткости и поперечных сил на характер деформирования сечений и потерю устойчивости сжатых стержневых элементов. В труде [21] на основе стержневой аналогии в общем виде приведено решение задачи о деформированном состоянии составного стержня с ветвями из нелинейно упругого материала, соединенными структурными связями в виде решеток из раскосов или планок. Рассмотренные решения, построенные на основе стержневой аналогии, обладают меньшей трудоемкостью по сравнению с 3D конечно-элементным анализом, однако решения проблемы учета сцепления арматурных стержней и бетона при внецентренном сжатии динамически нагружаемых железобетонных элементов каркасов зданий в научной литературе автором данного исследования не выявлено.

В связи с отсутствием решения задачи об устойчивости внецентренно сжатых динамически нагружаемых железобетонных элементов каркасов зданий с учетом сцепления арматуры с бетоном цель данной работы — построение расчетной модели и разработка на ее основе методики нелинейного деформационного расчета и анализа устойчивости деформированного состояния таких элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Учет влияния деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона на изгибную жесткость составного сечения железобетонного стержневого элемента (рис. 1, а) при внецентренном сжатии выполним с помощью теории состав-

ных стержней и пластин с распределенными по поверхности связями сдвига и поперечными связями, предложенной А.Р. Ржаницыным [22], следуя которой условие равновесия для составного стержня (рис. 1, б) может быть записано в виде:

$$\begin{cases} M = M^0 + M_i^T; \\ N_i = N_i^0 - T_i, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$M^0 = M_i^0 + M_{i+1}^0 + M_{i-1}^0; M_i^T = -T_i c_i; T_i = \int_0^x \tau_i dx;$$

$M_i^0, M_{i+1}^0, M_{i-1}^0$ — моменты в стержнях составного элемента, полученные в предположении отсутствия сил сцепления между ними. Поскольку размеры поперечных сечений арматурных стержней малы по сравнению с размерами поперечного сечения всего железобетонного элемента, в дальнейшем будем считать, что моменты в арматурных стержнях равны нулю, а касательные усилия, действующие по поверхности арматурного стержня, будем относить к оси, проходящей через центр тяжести его поперечного сечения (рис. 1, с). Принятые допущения вполне согласуются с общепринятой моделью, используемой для расчета изгибаемых и внецентренно сжатых элементов; N_i^0 — равнодействующая нормальных усилий в стержне от внешней нагрузки при условии отсутствия сил сцепления между стержнями составного элемента (в рассматриваемом случае — между арматурой и бетонной матрицей); τ_i — условные касательные напряжения, действующие по поверхности контакта арматуры и бетона. Условными они названы потому, что действительный характер распределения напряжений в бетонном цилиндре, прилегающем к арматурному стержню, представляет собой сложную схему.

При этом будем полагать, что жесткость поперечных связей достаточно велика, чтобы в рамках разрабатываемой модели считать их бесконечно жесткими. Данное допущение позволяет сократить число неизвестных в разрешающих уравнениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение расчетной модели внецентренно сжатого железобетонного стержня с учетом сдвигов в зоне контакта арматуры с бетоном

С учетом выражения (1) деформации сдвига арматурных стержней могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \Gamma'_1 &= \frac{T''_1}{\xi_1} = \Delta_{11} T_1 + \Delta_{12} T_2 + \frac{\sum N^0}{\sum B_{M,red}} c_1 w + \Delta_{10}; \\ \Gamma'_2 &= \frac{T''_2}{\xi_2} = \Delta_{12} T_1 + \Delta_{22} T_2 + \frac{\sum N^0}{\sum B_{M,red}} c_2 w + \Delta_{20}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\Delta_{10} = \frac{N^0_1}{B_{N,red,1}} - \frac{N^0_0}{B_{N,red,0}} - \frac{M^0 c_1}{\sum B_{M,red}};$$

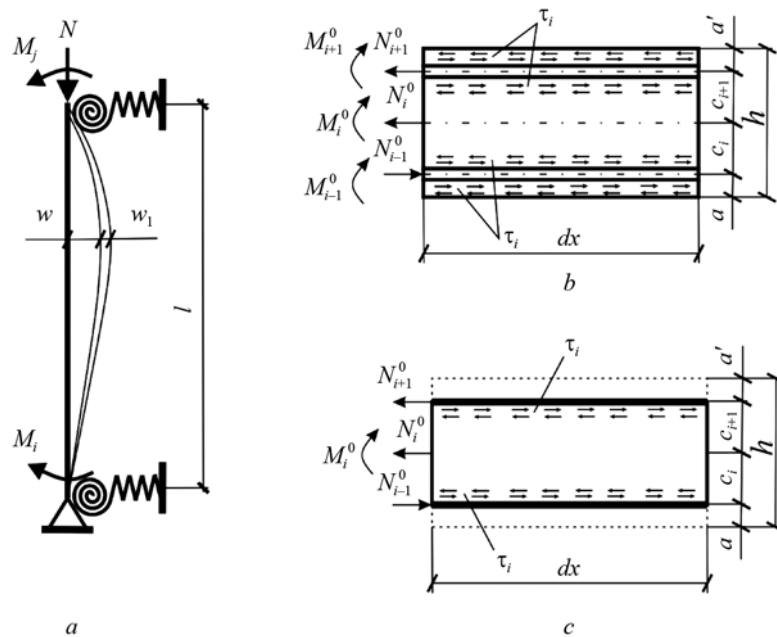


Рис. 1. Расчетная схема: внецентренно сжатого стержневого элемента (а); элементарного участка внецентренно сжатого железобетонного элемента (b); модифицированная расчетная схема элементарного участка внецентренно сжатого железобетонного элемента (с)

Fig. 1. The structural model of (a) an eccentrically compressed bar element; (b) the part of an eccentrically compressed reinforced concrete element; (c) a modified structural model of the part of an eccentrically compressed reinforced concrete element

$$\Delta_{20} = \frac{N_2^0}{B_{N,red,2}} - \frac{N_1^0}{B_{N,red,1}} - \frac{M^0 c_2}{\sum B_{M,red}};$$

$$\Delta_{11} = \frac{1}{B_{N,red,1}} + \frac{1}{B_{N,red,0}} + \frac{c_1^2}{\sum B_{M,red}};$$

$$\Delta_{22} = \frac{1}{B_{N,red,2}} + \frac{1}{B_{N,red,1}} + \frac{c_2^2}{\sum B_{M,red}};$$

$$\Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{c_1 c_2}{\sum B_{M,red}}.$$

В этих выражениях приняты следующие обозначения: Γ'_1, Γ'_2 — деформации сдвига; T_1, T_2 — суммарные усилия сдвига, действующие по поверхности контакта арматурного стержня и бетона; ξ_1, ξ_2 — коэффициенты сдвиговой жесткости поверхности контакта арматурных стержней и бетона, определяемые по диаграммам $\tau - \Gamma'$; $B_{N,red,1}$ — жесткость поперечного сечения бетонной матрицы на сжатие (растяжение) с учетом деформированного состояния; $B_{N,red,0}, B_{N,red,2}$ — соответственно жесткости поперечных сечений арматурных стержней на растяжение (сжатие) с учетом деформированного состояния; $\sum B_{M,red}$ — жесткость на изгиб поперечного сечения бетонной матрицы в предположении отсутствия сил сцепления по поверхности контакта арматуры и бетона с учетом деформированного состояния; c_1, c_2 — расстояния между центрами тяжести арматурных стержней и бетонной матрицы с учетом деформированного состояния; $\sum N^0$ — сумма продольных усилий, действующих в арматуре

и бетоне, полученных в предположении отсутствия сил сцепления; w — смещение упругой оси внецентренно сжатого железобетонного элемента.

Входящие в выражение (2) жесткости $B_{N,red,1}, \sum B_{M,red}$ прямоугольного бетонного сечения будем искать с учетом диаграммы деформирования бетона, в которой ветви, соответствующие растяжению и сжатию, аппроксимируем параболами:

$$B_{M,red} = EJ_{red} - B_{N,red,1} a_1^2,$$

$$J_{red,1} = b \int_{h_{crc}}^{h-x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_{bt}}\right) y^2 dy + b \int_{h-x}^h \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_b}\right) y^2 dy;$$

$$B_{N,red,1} = EA_{red,1} = Eb \int_{h_{crc}}^{h-x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_{bt}}\right) dy + Eb \int_{h-x}^h \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_b}\right) dy;$$

$$S_{red,1} = b \int_{h_{crc}}^{h-x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_{bt}}\right) y dy + b \int_{h-x}^h \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\hat{\varepsilon}_b}\right) y dy; a_1 = \frac{S_{red,1}}{A_{red,1}},$$

где E — начальный модуль упругости бетона; J_{red} — момент инерции приведенного поперечного сечения относительно растянутой (наименее сжатой) грани бетонного элемента; $A_{red,1}$ — площадь приведенного поперечного сечения бетонного элемента; $S_{red,1}$ — статический момент приведенного поперечного сечения бетонного элемента; a_1 — координата центра тяжести приведенного сечения, отсчитываемая от оси, относительно которой определен $S_{red,1}$; x — высота сжатой зоны; b, h — ширина и высота поперечного сечения соответственно; h_{crc} — глубина трещины, образовавшейся в сечении. Если элемент

работает без трещин, то величина h_{cr} приравняется к нулю; ε — деформация в произвольной точке сечения бетонного элемента; $\hat{\varepsilon}_b, \hat{\varepsilon}_{bt}$ — параметры нелинейной диаграммы деформирования бетона, принимаемые по приложению Г СП 63.13330.2018.

Процесс деформирования элементов железобетонных каркасов зданий характеризуется резкой сменой режима при внезапной структурной перестройке несущей системы, вызванной удалением одного из несущих элементов. В качестве деформационной реологической модели статико-динамического сопротивления бетона предлагается использовать модель, состоящую из двух последовательно соединенных элементов (рис. 2): квазиупругого элемента, которому соответствует секущий модуль упругости $E_{sec,0}$, вычисленный с учетом деформаций ползучести и упруго-вязкого элемента, представленного моделью Кельвина – Фойгта [23]. С учетом принятой модели физические соотношения для этапа динамического догружения системы примут вид:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E_{sec,0}} (1 - e^{-\omega t}), \quad \omega = \frac{E_{sec,0}}{K}, \quad (3)$$

где $\Delta \varepsilon, \Delta \sigma$ — приращение напряжений и относительных деформаций в сечении конструктивного элемента при его динамическом догружении; t — время динамического догружения несущих элементов конструктивной системы при ее внезапной структурной перестройке; $E_{sec,0}$ — секущий модуль деформации бетона для стадии нормальной эксплуатации, определяемый с учетом неравновесных процессов длительного силового и средового сопротивления [24]; K — модуль вязкого сопротивления элемента.

Динамический касательный модуль деформации бетона для расчета внецентренно сжатых элементов при их динамическом догружении с учетом выражения (3) определим из выражения:

$$E_{t,d}(y) = \frac{E_t}{(1 - e^{-\omega t})},$$

где $E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ — касательный модуль для деформированного состояния, предшествующего динамическому догружению.

Полученное выражение динамического модуля деформации следует разделить на начальный модуль упругости бетона и внести в подынтегральные выражения для $J_{red,1}, A_{red,1}, S_{red,1}$.

Уравнение равновесия деформированного состояния внецентренно сжатого составного стержневого элемента (рис. 1, а), следуя подходу, предложенному в работе [25], и его практической реализации для железобетонного стержневого элемента без учета сдвигов [26], может быть записано в приращениях в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sum B_{M,red} w_1'' + N w_1 &= \\ &= - \sum N_i \left(e_0 + e_i \frac{x}{l} + e_j \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right) + \sum T_i c_i, \end{aligned} \quad (4)$$

где w_1 — приращение прогиба упругой линии составного стержня; N — внешняя продольная сила, действующая на составной стержневой элемент; $e_0 = e_0(x)$ — начальная погрешность упругой линии составного стержневого элемента; e_i, e_j — расчетные эксцентриситеты на концах составного стержневого элемента, определяемые как отношение приложенных к концевым сечениям изгибающих моментов к продольной силе.

Для определения деформированного состояния стержневого внецентренно сжатого железобетонного элемента с учетом сдвиговых деформаций по поверхности контакта арматуры и бетона уравнение (4) необходимо решать совместно с системой (2). При этом приращения прогиба w_1 следует заменить на его абсолютное значение w .

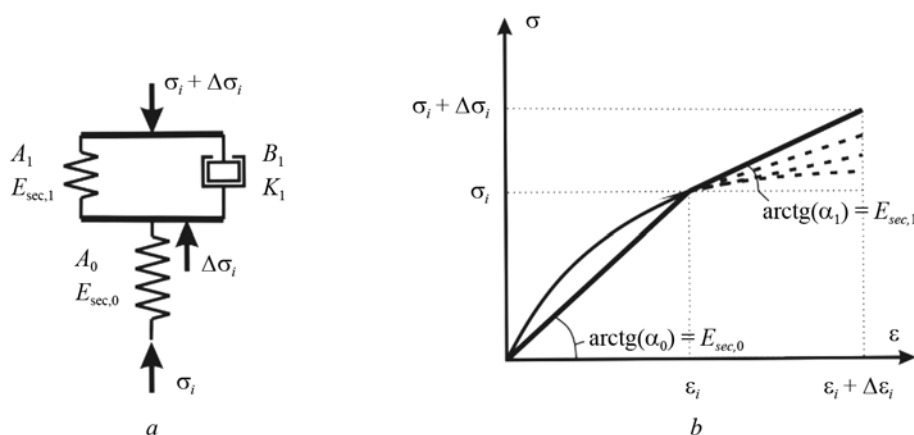


Рис. 2. К учету режима нагружения: модель статико-динамического сопротивления (а); диаграмма статико-динамического деформирования (б)

Fig. 2. Regarding the loading pattern: (a) the model of static-dynamic resistance; (b) the diagram of static-dynamic deformation

В первом приближении зададимся функциями сдвигающих усилий T_i и прогиба w в виде полуволны синусоиды:

$$T_i = \alpha_i \sin \chi x; \quad w = \alpha_w \sin \chi x, \quad (5)$$

где α_i, α_w, χ — некоторые параметры, соответствующие граничным условиям задачи.

С учетом подстановки выражения (5) система уравнений (2), (4) может быть записана в матричном виде:

$$[\alpha_k][\Delta_{kj}] \sin \chi x = [\Delta_{k0}], \quad (6)$$

где $[\alpha_k]^T = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_w]$ — матрица неизвестных параметров из выражения (5);

$$[\Delta_{kj}] = \begin{bmatrix} \left(\Delta_{11} + \frac{\chi^2}{\xi_1} \right) & \Delta_{12} & \frac{\sum N_i}{\sum B_{M,red}} c_1 \\ \Delta_{21} & \left(\Delta_{22} + \frac{\chi^2}{\xi_2} \right) & \frac{\sum N_i}{\sum B_{M,red}} c_2 \\ \frac{\sum N_i}{\sum B_{M,red}} c_1 & \frac{\sum N_i}{\sum B_{M,red}} c_2 & \left(\frac{(\sum N_i)^2}{\sum B_{M,red}} + \chi^2 \sum N_i \right) \end{bmatrix},$$

$$[\Delta_{k0}]^T = [\Delta_{10} \quad \Delta_{20} \quad \Delta_{w0}],$$

$$\Delta_{w0} = - \frac{\sum N_i}{\sum B_{M,red}} \sum N_i \left(e_0 + e_i \frac{x}{l} + e_j \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right).$$

Решение матричного уравнения (6) шагово-итерационным методом в предположении нелинейно упругого закона деформирования бетона позволяет найти деформированное состояние внецентренно сжатого элемента при заданных параметрах воздействий.

При оценке устойчивости этого деформированного состояния будем полагать, что малое возмущение, вызывающее отклонение упругой оси составного стержневого элемента от его равновесного деформированного состояния, вызвано только приращением деформации. Тогда правая часть матричного уравнения (6), являющаяся приращением внешнего по отношению к стержню момента, может быть приравнена к нулю $[\Delta_{k0}] = 0$, а в выражениях для жесткостей поперечных сечений необходимо заменить $2\hat{\varepsilon}_{bt}$ и $2\hat{\varepsilon}_b$ на $\hat{\varepsilon}_{bt}$ и $\hat{\varepsilon}_b$ соответственно, чтобы перейти от жесткости сечений к их отпорности — способности уравнивать бесконечно малые приращения внешних усилий.

Алгоритм проверки устойчивости железобетонного внецентренно сжатого стержневого элемента

С целью учета упругопластического характера деформирования бетона и стальной арматуры при решении задачи об устойчивости динамически нагружаемого железобетонного внецентренно сжатого стержневого элемента каркаса здания с учетом сдвигов в зоне контакта арматуры и бетона был

разработан соответствующий алгоритм нелинейного расчета. Последовательность расчета устойчивости деформированного состояния внецентренно сжатых железобетонных стержневых элементов несущей системы здания при внезапном динамическом догружении с учетом сдвиговых деформаций по поверхности контакта арматуры и бетона состоит из следующих этапов (рис. 3):

1. Создается КЭ модель каркаса здания, назначаются геометрические размеры сечений (b, h, a, a', d_s), задаются законы деформирования материалов $\sigma = f(\varepsilon)$, коэффициенты сдвиговой жесткости поверхности контакта арматуры и бетона. Из предварительных расчетов назначается время динамического догружения t_d , с учетом которого вычисляются параметры прочности и деформативности при динамическом воздействии.

2. Задаются стадии монтажа (демонтажа) несущих элементов модели, а также последовательность приложения постоянных, длительных и особых нагрузок q . В качестве особой нагрузки к системе по месту удаляемого элемента прикладывается обобщенное усилие, равное по величине и противоположное по знаку усилию, действовавшему в удаляемом элементе.

3. Выполняется расчет каркаса здания шагово-итерационным методом, в результате чего определяется деформированное состояние системы.

4. Полученная по результатам деформационного расчета матрица жесткости расчетной модели корректируется путем приведения жесткостей поперечных сечений конечных элементов по касательным модулям деформации.

5. Выполняется расчет устойчивости деформированного состояния линейризованной расчетной модели несущей системы здания на особое воздействие, вызванное внезапным удалением одного из несущих элементов конструктивной системы.

Таким образом, расчет на устойчивость нелинейно деформируемых внецентренно сжатых железобетонных элементов несущих систем зданий с учетом деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона при особом аварийном воздействии сводится к расчету устойчивости деформированного состояния линейризованной модели, состоящей из элементов ступенчато-переменной жесткости по их длине. Полученное в результате такого расчета значение критической силы следует сопоставить с усилиями в соответствующих конструктивных элементах, полученных в результате деформационного расчета на динамическое догружение, вызванное внезапным аварийным отказом одного из несущих элементов конструктивной системы. Устойчивость конструктивной системы будет обеспечена в том случае, если соблюдается условие:

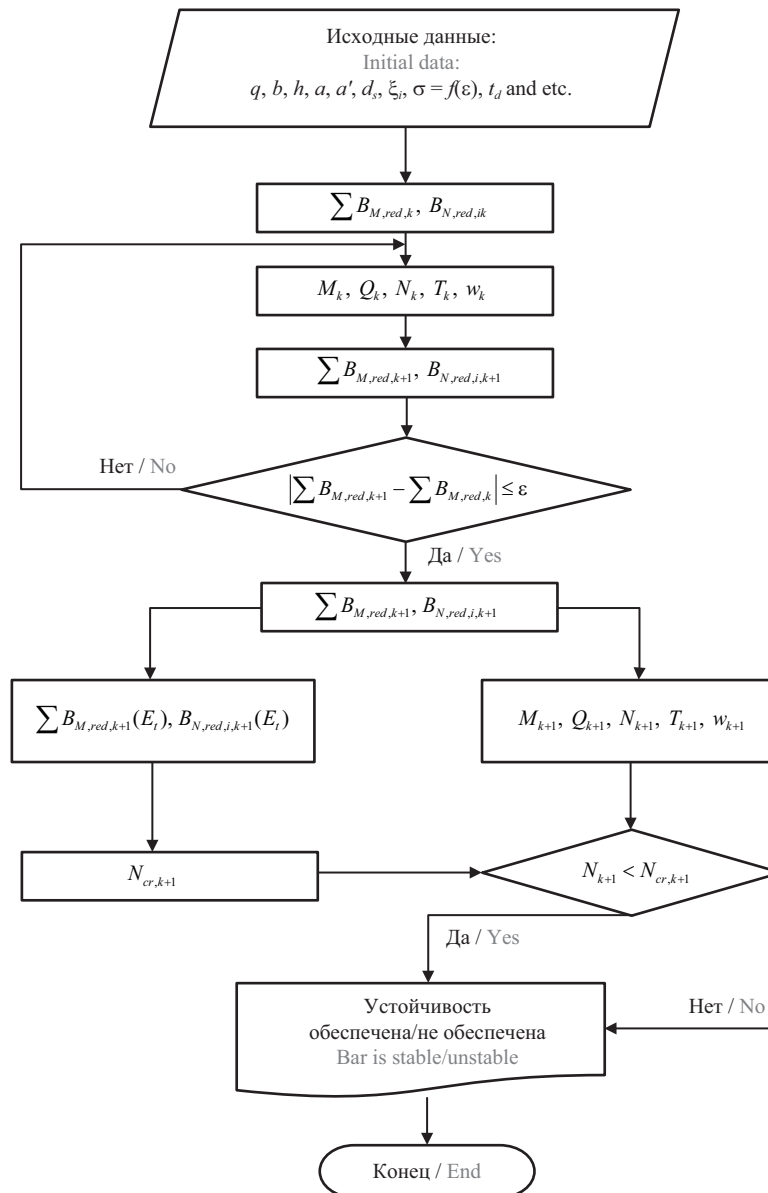


Рис. 3. Алгоритм проверки устойчивости железобетонного внецентренно сжатого стержневого элемента с учетом деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона

Fig. 3. A stability analysis algorithm for an eccentrically compressed reinforced concrete bar element with account taken of shear deformations at the interface between reinforcement bars and concrete

$$N_{cr, dyn} > N_{dyn},$$

где $N_{cr, dyn}$ — критическая сила, вызывающая потерю устойчивости системы, жесткость которой определена на основании ее деформационного расчета на особое аварийное воздействие; N_{dyn} — динамическое усилие в элементе рассматриваемой конструктивной системы.

Поскольку в предложенной постановке задачи значение критической силы устанавливается для всей рассматриваемой системы, то для выявления наиболее опасных с точки зрения потери устойчивости элементов конструктивной системы могут быть использованы энергетические критерии, опре-

деляемые работой узловых изгибающих моментов и поперечных сил $A(M, Q)$ в процессе изгиба [27]. Несущему элементу каркаса здания, теряющему устойчивость, соответствует наибольшая по модулю отрицательная работа узловых изгибающих моментов и поперечных сил:

$$A_i(M, Q) < 0.$$

При разбиении конструктивного элемента на ряд конечных элементов (например, при расчете по МКЭ) данный критерий может быть также использован для выявления наиболее чувствительных к потере устойчивости участков конструктивных элементов каркаса здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в работе расчетные зависимости для учета деформаций сдвига по поверхности контакта арматуры и бетона во внецентренно сжатых железобетонных стержневых элементах каркасов зданий и сооружений позволяют выполнить расчет устойчивости деформированного состояния таких элементов при особых воздействиях, вызванных внезапным удалением одного из несущих элементов конструктивной системы. Учет деформаций сдвига дает возможность более точно моделировать деформирование стержневых элементов на участках с высоким градиентом напряжений, к которым,

например, относятся узлы сопряжения колонн с ригелями.

Некоторые неточности, связанные с принятыми при построении расчетных зависимостей допущениями о форме деформирования и характере распределения сдвигающих усилий по длине элемента по полуволне синусоиды, могут быть компенсированы путем разбиения конструктивного элемента при построении расчетной модели на ряд участков. Ранее выполненные численные исследования для стержней без учета влияния деформаций сдвига при заданной форме деформирования по полуволне синусоиды показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
2. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11. P. e00264. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00264
3. Kiakojoury F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061
4. Fan W., Liu B., Consolazio G.R. Residual capacity of axially loaded circular rc columns after lateral low-velocity impact // *Journal of Structural Engineering*. 2019. Vol. 145. Issue 6. P. 04019039. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002324
5. Barabash M.S., Romashkina M.A. Lira-sap program for generating design models of reconstructed buildings // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. Issue 4. Pp. 70–80. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-4-70-80
6. Mazzarolo E., Scotta R., Berto L., Saetta A. Long anchorage bond-slip formulation for modeling of r.c. elements and joints // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 34. Pp. 330–341. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.09.005
7. Park R. A summary of results of simulated seismic load tests on reinforced concrete beam-column joints, beams and columns with substandard reinforcing details // *Journal of Earthquake Engineering*. 2002. Vol. 6. Issue 2. Pp. 147–174. DOI: 10.1080/13632460209350413
8. Tamrazyan A.G., Popov D.S., Ubysz A. To the dynamically loaded reinforced-concrete elements' calculation in the absence of adhesion between concrete and reinforcement // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. P. 022012. DOI: 10.1088/1757-899x/913/2/022012
9. Jacques E., Saatcioglu M. High strain rate bond characteristics of reinforced concrete beam-ends // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 130. Pp. 192–202. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.012
10. Long X., Wang C.-Y., Zhao P.-Z., Kang S.-B. Bond strength of steel reinforcement under different loading rates // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 238. P. 117749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117749
11. Noh H.M., Sonoda Y. Potential effects of corrosion damage on the performance of reinforced concrete member // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 47. P. 02007. DOI: 10.1051/mateconf/20164702007
12. Zhang Z., Gong R., Zhang H., He W. The Sustainability performance of reinforced concrete structures in tunnel lining induced by long-term coastal environment // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 10. P. 3946. DOI: 10.3390/su12103946
13. Hayati N., Hamid A. Seismic performance of interior beam-column joint with fuse-bar designed using Ec8 under in-plane lateral cyclic loading // *International Conference on Disaster Management and Civil Engineering (ICDMCE'15)* Oct. 1–3, 2015 Phuket (Thailand). 2015. DOI: 10.17758/ur.u1015302
14. Tran X.H., Kai Y. Modeling of interior reinforced concrete beam-column joint based on an innovative theory of joint shear failure // *Japan Architectural Review*. 2019. Vol. 2. Issue 3. Pp. 287–301. DOI: 10.1002/2475-8876.12076
15. Abdelwahed B. Beam-column joints reinforcement detailing adequacy in case of a corner column loss-numerical analysis // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019. Vol. 16. Issue 7. DOI: 10.1590/1679-78255536
16. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyamar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. P. 02016. DOI: 10.1051/mateconf/201711602016

17. Feng D.-C., Wu G., Lu Y. Numerical investigation on the progressive collapse behavior of precast reinforced concrete frame subassemblages // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2018. Vol. 32. Issue 3. P. 04018027. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001179

18. Niki V., Erkmen R.E. Shear deformable hybrid finite element formulation for buckling analysis of composite columns // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 45. Issue 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1139/cjce-2017-0159

19. Simão P.D. Influence of shear deformations on the buckling of columns using the Generalized Beam Theory and energy principles // *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2017. Vol. 61. Pp. 216–234. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2016.09.015

20. Zhang H., Kang Y.A., Li X.F. Stability and vibration analysis of axially-loaded shear beam-columns carrying elastically restrained mass // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. Issue 16–17. Pp. 8237–8250. DOI: 10.1016/j.apm.2013.03.050

21. Рочев А.А. Пространственный расчет неупругих составных стержней // *Строительная меха-*

ника инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 1. С. 17–23.

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

23. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с.

24. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Ключева Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М. : Изд-во АСВ, 2014. 208 с.

25. Гемерлинг А.В. Расчет стержневых систем. М. : Стройиздат, 1974. 207 с.

26. Fedorova N.V., Savin S.Y., Kolchunov V.I. Affecting of the long-term deformation to the stability of rc frame-bracing structural systems under special accidental impacts // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032005. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032005

27. Александров А.В., Травуш В.И., Матвеев А.В. О расчете стержневых конструкций на устойчивость // *Промышленное и гражданское строительство*. 2002. № 3. С. 16–19.

Поступила в редакцию 15 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 26 января 2021 г.

Одобрена для публикации 26 января 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Сергей Юрьевич Савин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388; SavinSYU@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082

2. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion. *Case Studies in Construction Materials*. 2019; 11:e00264. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00264

3. Kiakojour F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*. 2020; 206:110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061

4. Fan W., Liu B., Consolazio G.R. Residual capacity of axially loaded circular rc columns after lateral low-velocity impact. *Journal of Structural Engineering*. 2019; 145(6):04019039. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002324

5. Barabash M.S., Romashkina M.A. Lira-sap program for generating design models of reconstructed

buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(4):70-80. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-4-70-80

6. Mazzarolo E., Scotta R., Berto L., Saetta A. Long anchorage bond-slip formulation for modeling of r.c. elements and joints. *Engineering Structures*. 2012; 34:330-341. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.09.005

7. Park R. A summary of results of simulated seismic load tests on reinforced concrete beam-column joints, beams and columns with substandard reinforcing details. *Journal of Earthquake Engineering*. 2002; 6(2):147-174. DOI: 10.1080/13632460209350413

8. Tamrazyan A.G., Popov D.S., Ubysz A. To the dynamically loaded reinforced-concrete elements' calculation in the absence of adhesion between concrete and reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 913:022012. DOI: 10.1088/1757-899x/913/2/022012

9. Jacques E., Saatcioglu M. High strain rate bond characteristics of reinforced concrete beam-ends.

- International Journal of Impact Engineering*. 2019; 130:192-202. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.012
10. Long X., Wang C.-Y., Zhao P.-Z., Kang S.-B. Bond strength of steel reinforcement under different loading rates. *Construction and Building Materials*. 2020; 238:117749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117749
 11. Noh H.M., Sonoda Y. Potential effects of corrosion damage on the performance of reinforced concrete member. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 47:02007. DOI: 10.1051/mateconf/20164702007
 12. Zhang Z., Gong R., Zhang H., He W. The Sustainability performance of reinforced concrete structures in tunnel lining induced by long-term coastal environment. *Sustainability*. 2020; 12(10):3946. DOI: 10.3390/su12103946
 13. Hayati N., Hamid A. Seismic performance of interior beam-column joint with fuse-bar designed using Ec8 under in-plane lateral cyclic loading. *International Conference on Disaster Management and Civil Engineering (ICDMCE'15) Oct. 1-3, 2015 Phuket (Thailand)*. 2015. DOI: 10.17758/ur.u1015302
 14. Tran X.H., Kai Y. Modeling of interior reinforced concrete beam-column joint based on an innovative theory of joint shear failure. *Japan Architectural Review*. 2019; 2(3):287-301. DOI: 10.1002/2475-8876.12076
 15. Abdelwahed B. Beam-column joints reinforcement detailing adequacy in case of a corner column loss-numerical analysis. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019; 16(7). DOI: 10.1590/1679-78255536
 16. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyamar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 116:02016. DOI: 10.1051/mateconf/201711602016
 17. Feng D.-C., Wu G., Lu Y. Numerical investigation on the progressive collapse behavior of precast reinforced concrete frame subassemblages. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2018; 32(3):04018027. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001179
 18. Niki V., Erkmen R.E. Shear deformable hybrid finite element formulation for buckling analysis of composite columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2018; 45(4):279-288. DOI: 10.1139/cjce-2017-0159
 19. Simão P.D. Influence of shear deformations on the buckling of columns using the Generalized Beam Theory and energy principles. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2017; 61:216-234. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2016.09.015
 20. Zhang H., Kang Y.A., Li X.F. Stability and vibration analysis of axially-loaded shear beam-columns carrying elastically restrained mass. *Applied Mathematical Modelling*. 2013; 37(16-17):8237-8250. DOI: 10.1016/j.apm.2013.03.050
 21. Rochev A.A. Spatial calculation of inelastic composite bars. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2012; 1:17-23. (rus.).
 22. Rzhantsyn A.R. *Built-up bars and plates*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 316. (rus.).
 23. Geniyev G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. *Plasticity theory of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 316. (rus.).
 24. Kolchunov V.I., Androsova N.B., Klyueva N.V., Bukhtiyarova A.S. *Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts*. Moscow, ASV Publishing, 2014; 208. (rus.).
 25. Gemmerling A.V. *Bar structural systems analysis*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 207. (rus.).
 26. Fedorova N.V., Savin S.Y., Kolchunov V.I. Affecting of the Long-Term Deformation to the Stability of RC Frame-Bracing Structural Systems under Special Accidental Impacts. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032005. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032005
 27. Alexandrov A.V., Travush V.I., Matveev A.V. On the calculation of rod structures for stability. *Industrial and Civil Engineering*. 2002; 3:16-19. (rus.).

Received December 15, 2020.

Adopted in revised form on January 26, 2021.

Approved for publication on January 26, 2021.

BIONOTES: **Sergey Yu. Savin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388; SavinSYU@mgisu.ru.

Разработка наномодифицированных полифункциональных защитных систем для деревянных конструкций

Е.Н. Покровская

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время многоэтажные дома из деревянных конструкций строятся в разных странах. Долговечность конструкций в большой степени зависит от применяемых защитных систем. Наиболее эффективными являются полифункциональные защитные системы, которые комплексно увеличивают огнестойкость, гидрофобность, биостойкость материалов конструкций. Предполагается, что введение углеродных нанотрубок (УНТ) обеспечит создание более равномерного защитного слоя и улучшит характеристики покрытия. Цель работы — разработка полифункциональной защитной системы для деревянных конструкций. Данная система должна обеспечивать огнестойкость, гидрофобность и не ухудшать механических свойств древесины.

Материалы и методы. Исследования проводились на образцах древесины сосны. В качестве наномодификаторов использовались УНТ. Основной платформой для создания полифункциональных защитных систем были образцы древесины, поверхностно модифицированные фосфоновыми кислотами — метилфосфоновой и нитрило-триметилфосфоновой. Комплексные защитные системы создавались путем введения УНТ. Оценка пожароопасных свойств осуществлялась по ГОСТ 27484-87, водопоглощения — по ГОСТ 16483.20-72, механических свойств — по ГОСТ 16483.11-72 и 16483.10-73. Гидрофобность оценивалась методом краевого угла смачивания. Характер поверхности образцов и ее химический состав изучались с применением двухлучевого сканирующего электронно-ионного микроскопа FEI Quanta 3D FEG с приставкой для энергодисперсионного анализа EDAX Octane Elect.

Результаты. Все исследованные системы покрытий относятся к первой группе огнестойкости, лучшие из них снижают потерю массы при горении образцов $\Delta_m = 3,7 - 1,34$ %. Древесина приобретает гидрофобные свойства, водопоглощение снижается в 1,5 раза. Увеличивается механическая прочность на сжатие поперек волокон в 1,6 раза. Оценка характера поверхности и ее химического состава показывает, что высокая огнестойкость коррелирует с повышенным содержанием фосфора в коксовом слое, образовавшемся в ходе горения.

Выводы. Поверхностное модифицирование древесины в тонких слоях созданными защитными системами рекомендуется в качестве эффективного средства для увеличения долговечности конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, поверхностное модифицирование, фосфоновые кислоты, углеродные нанотрубки, элементный анализ, коксовый слой, полифункциональные системы защиты

Благодарности. Автор выражает благодарность сотрудникам физического факультета МГУ К.Е. Озеровой и И.П. Иваненко, а также компании ООО «Серния Инжиниринг» за методическую поддержку при визуализации экспериментальных образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Покровская Е.Н. Разработка наномодифицированных полифункциональных защитных систем для деревянных конструкций // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 59–66. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.59-66

Development of nanomodified multifunctional protection systems for wood structures

Elena N. Pokrovskaya

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

ABSTRACT

Introduction. Nowadays multi-storey buildings, composed of wood structures, are built in different countries. The durability of structures depends to a large extent on the protection systems used. The most effective ones are multifunctional protection systems that rise the fire protection ability, hydrophobicity, and biostability of structural materials. The application of carbon nanotubes is expected to improve the uniformity of a protective layer and the coating performance. The purpose of the project is to develop a multifunctional protection system designated for wood structures. This system must ensure their fire resistance and hydrophobicity without deteriorating the mechanical properties of wood.

Materials and methods. Pine wood samples were used in the research. Carbon nanotubes were used as nano-modifiers. Wood samples, surface-modified with methylphosphonic (MPH) and nitrilo-trimethylphosphonic (NPH) acids, were used to develop multifunctional protection systems. Integrated protection systems were developed by adding carbon nanotubes. Fire hazard properties were assessed pursuant to GOST 27484-87, water absorption properties were analyzed pursuant to GOST 16483.20-72, mechanical properties were addressed with reference to GOST 16483.11-72 and 16483.10-73. Hydrophobicity was evaluated using the wetting angle method. The character of the sample surface and its chemical composition

were studied using the double-beam scanning electron-ion microscope FEI Quanta 3D FEG with an EDAX Octane select attachment needed for the energy dispersion analysis.

Results. All studied coating systems belong to the first group of the fire retardant efficiency, the best of them reduce weight loss in the course of combustion of samples: $\Delta_{\text{weight}} = 3.7 - 1.34 \%$. Wood develops hydrophobic properties; its water absorption reduces 1.5-fold, while its across-fiber mechanical compressive strength goes up 1.6-fold. The assessment of the wood surface and its chemical composition shows that high fire resistance correlates with higher phosphorus content in the char layer formed during combustion.

Conclusions. Surface modification of wood by protection systems is recommended as an effective means of rising the durability of structures.

KEYWORDS: wood structures, surface modification, phosphonic acids, carbon nanotubes, elemental analysis, char layer, multifunctional protection systems

Acknowledgements. The author thanks K.E. Ozerova and I.P. Ivanenko, employees of the faculty of physics of the Moscow State University, as well as "Serniya Engineering" company for their methodological support provided in respect of the visualization of experimental samples by means of scanning electron microscopy.

FOR CITATION: Pokrovskaya E.N. Development of nanomodified multifunctional protection systems for wood structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):59-66. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.59-66 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многоэтажные дома из деревянных конструкций получают все большее распространение. Такие высотные здания построены в Нидерландах, Австрии, Норвегии, Канаде. Проектирование многоэтажных деревянных жилых домов проводится и в России [1, 2]. Долговечность зданий и сооружений обеспечивается долговечностью конструкции. Древесина — прекрасный строительный материал, но относится к горючим материалам [3]. При высокой влажности происходит ее разрушение, которое усиливается в присутствии биологических агентов различной природы [4, 5]. Для деревянных конструкций высотных зданий актуальной задачей является разработка эффективных в тонких слоях защитных систем, которые не увеличивают вес конструкций. Долговечность защитного действия обеспечивается модифицированием поверхностного слоя. Настоящая работа посвящена созданию эффективной защитной системы, состоящей из фосфоновых кислот и углеродных нанотрубок (УНТ). Предполагается, что введение углеродных нанотрубок обеспечит создание более равномерного защитного слоя и улучшит характеристики покрытия. Цель исследования — разработка полифункциональной защитной системы для деревянных конструкций. Данная система должна обеспечивать огнезащитность, гидрофобность и не ухудшать механических свойств древесины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В России, как и во многих других странах, основным материалом для деревянных конструкций многоэтажного строительства служит сосна. В связи с этим для изготовления опытных образцов использована древесина заболони сосны. Для большинства исследований готовились образцы размерами $30 \times 20 \times 20$ мм. Испытания на пожароопасность проводились по ГОСТ 27484-87 на образцах размерами $50 \times 50 \times 10$ мм.

Основной платформой для создания наномодифицированных полифункциональных защитных составов были образцы древесины, поверхностно модифицированные 30%-ным водным раствором метилфосфоновой кислоты $\text{CH}_3\text{PO}(\text{OH})_2$ (МФ) и 30%-ным водным раствором нитрилтриметилфосфоновой кислоты $\text{N}[(\text{PO}(\text{OH})(\text{OCH}_3))]_3$ (НТФ). В процессе модификации поверхности древесины фосфоновые кислоты вступают в химическое взаимодействие с компонентами лигноуглеводного комплекса, придавая поверхности гидрофобные свойства [6]. В качестве нанодисперсных модификаторов этих составов использовали УНТ, представляющие собой прочные цилиндрические структуры. В сухом виде УНТ имеют вид частиц черного цвета. Удельная площадь поверхности данного модификатора достигает $2600 \text{ м}^2/\text{г}$. В настоящем исследовании УНТ применялись в виде взвесей различных концентраций в воде [7].

Водные растворы фосфоновых кислот наносились на поверхность образцов древесины с расходом $180 \text{ г}/\text{м}^2$ в два слоя, что обеспечивает тонкослойное покрытие. Одновременно с этим готовились образцы, модифицированные УНТ. Были изготовлены образцы с разной очередностью нанесения растворов фосфоновых кислот и взвеси УНТ [8].

Испытания образцов на пожароопасность осуществлялись по ГОСТ 27484-87. Исследования проводились с использованием горелки с игольчатым пламенем, что позволяет оценить пожарную опасность по продолжительности тления ($t_{\text{тл}}$) и потери массы образца (Δ_m).

Оценка гидрофобных свойств поверхности модифицированных образцов проводилась методом определения краевого угла смачивания θ , град. [9, 10].

Определение водопоглощения W , %, древесины обязательно изучается при разработке полифункциональных защитных систем. Водопоглощение образцов определялось по ГОСТ 16483.20-72 весовым методом. Первое взвешивание производили после выдерживания образца в воде в течение двух часов,

а последующие через 1, 2, 3, 6, 9, 13 и 20 суток. Полученные данные позволяют оценить кинетику водопоглощения для каждого создаваемого состава.

Для изучения характера поверхности модифицированных образцов и ее химического состава использовался двухлучевой сканирующий электронно-ионный микроскоп (СЭМ) FEI Quanta 3D FEG и приставка для энергодисперсионного (ЭДС) анализа EDAX Octane Elect. Изображения морфологии экспериментальных образцов получены с помощью детектора вторичных электронов Эверхарта-Торнли (ETD). Проведение испытания на двухлучевом микроскопе дает возможность получить данные о количественном химическом составе и структуре поверхностного слоя модифицированных исследуемыми покрытиями образцов.

Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон по ГОСТ 16483.11-72. Для исследования готовятся образцы в виде прямоугольной призмы основанием 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Испытательная машина с устройством для записи нагрузки должна быть с масштабом не более 50 Н/мм. Условный предел прочности древесины $\sigma_{\text{вп}}$ в МПа вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{вп}} = \frac{P}{bl},$$

где P — нагрузка, соответствующая условному пределу прочности, Н; b и l — ширина и длина образца, мм.

Метод определения условного предела прочности при сжатии вдоль волокон по ГОСТ 16483.10-73. Суть метода такая же, как и в определении условного предела прочности при сжатии поперек волокон. Размеры образца 20×20 мм, длина 30 мм. Предел прочности древесины $\sigma_{\text{вд}}$ в МПа вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{вд}} = \frac{P_{\text{max}}}{ab},$$

где P_{max} — максимальная нагрузка, Н; a и b — размеры поперечного сечения образца, мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Как показали испытания, при поверхностном модифицировании древесины водными растворами фосфоновых кислот МФ и НТФ формируется покрытие, относящееся к первой группе огнезащитной эффективности по ГОСТ 27484-87. Модифицирование поверхности древесины УНТ без фосфоновых кислот не придает ей огнезащитных свойств в сравнении с древесиной без покрытия. С другой стороны, добавление УНТ в модифицирующие растворы на основе фосфоновых кислот усиливает огнезащитные свойства покрытий. При этом, как показали результаты испытаний, наилучшая огнезащитная эффективность достигается при использовании

УНТ в концентрации 0,1–0,5 %, которые наносятся первым слоем на поверхность древесины с последующим нанесением раствора НТФ в концентрации 30 %. В тех же случаях, когда УНТ оказываются в качестве верхнего слоя покрытия, огнезащитные свойства образца ухудшаются.

Поверхность образца, покрытого только слоем УНТ 0,1 %, после испытания игольчатым пламенем по ГОСТ 27484-87 показана на рис. 1. Как видно из рис. 1, на поверхности образца в ходе воздействия пламенем не образуется целостного укрупненного коксового слоя однородной структуры. Образовавшийся на поверхности образца коксовый слой имеет неоднородный характер, не является целостным и не проявляет огнезащитных свойств. Потери массы при горении такого образца превышают 50 %. Таким образом, УНТ в чистом виде не могут использоваться для придания покрытию огнезащитных свойств [11].

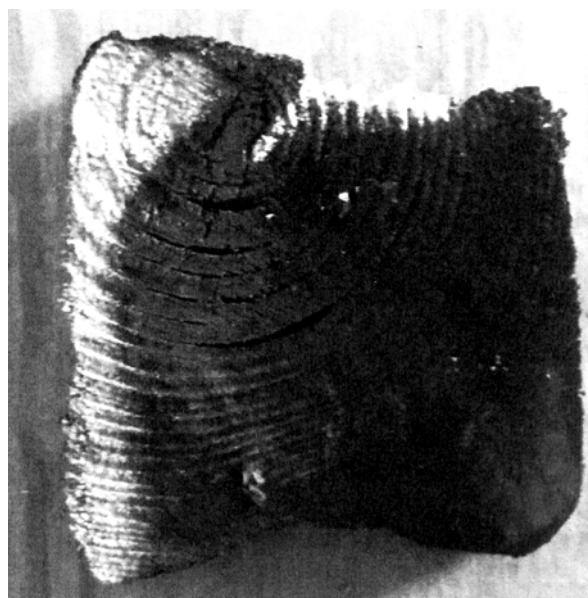


Рис. 1. Поверхность образца, модифицированного УНТ 0,01 % после испытания игольчатым пламенем

Fig. 1. The surface of a sample modified with 0.01 % CNT following a needle flame test

Как показало определение угла смачивания, модифицирование древесины растворами фосфоновых кислот увеличивает ее гидрофобность. При этом максимальное значение угла смачивания, что соответствует максимальной гидрофобности, достигается в тех случаях, когда УНТ оказываются в поверхностном слое покрытия.

Исследования продемонстрировали, что модифицирование поверхности древесины 30%-ными растворами фосфоновых кислот несколько снижает водопоглощение. Дополнительное введение в состав покрытия УНТ приводит к дополнительному

уменьшению водопоглощения в сравнении с покрытиями на основе только фосфоновых кислот без УНТ [12, 13]. Порядок нанесения компонентов системы ФОС-УНТ не оказывает значительного влияния на водопоглощение.

Как свидетельствуют результаты исследований механических свойств образцов (определение пределов прочности вдоль и поперек волокон), модифицирование поверхности древесины всеми использованными в опытах вариантами покрытий не оказывает заметного влияния на предел прочности вдоль волокон. Что касается предела прочности поперек волокон, он увеличивается при модифицировании УНТ в 1,6 раза. При модифицировании покрытиями, включающими УНТ и фосфоновые кислоты, предел прочности поперек волокон увеличивается до 40 % по сравнению с необработанными образцами [14] (табл. 1).

Результаты исследования поверхности модифицированных образцов с использованием двухлучевого сканирующего электронно-ионного микроскопа показали, что концентрация УНТ и порядок нанесения компонентов составов влияют на элементный состав поверхностного слоя, а также на элементный состав коксового слоя, образовавшегося при горении образца [6, 15, 16] (табл. 2).

Как следует из сопоставления данных табл. 2 с данными по потере массы образцов при их испытании на огнезащитную эффективность, высокая огнестойкость коррелирует с повышенным содержанием фосфора в коксовом слое, образовавшемся в ходе горения¹ [17].

¹ Passive Fire Protection. Protective Coatings. URL: <https://www.international-pc.com/type/passive-fire-protection/>

Табл. 1. Результаты испытаний опытных образцов

Table 1. Sample testing results

№	Покрытие Coating	$t_{\text{пл}}$, °C $t_{\text{smoldering}}$ degrees Celsius	Δ_m , % $\Delta_{\text{weight loss}}$, %	θ , град. θ — limiting wetting angle, degrees	W , % Water adsorption capacity, %	$\sigma_{\text{вв}}$, МПа σ_{wv} — wood compressive strength limit, MPa	$\sigma_{\text{вп}}$, МПа σ_{wp} simulated wood compressive strength limit, MPa
0	Без покрытия / No coating	184	80,42	28,0	94,75	44,00	5,20
1	НТФ 30 % / NPH 30 %	24	8,90	39,8	69,28	43,8	
2	МФ 30 % / MPH 30 %	58	12,01	42,1	70,03	43,9	
3	УНТ 0,01 % / CNT 0.01 %	392	70,02				
4	УНТ 0,1 % / CNT 0.1 %	257	62,10			45,00	8,45
5	УНТ 0,5 % / CNT 0.5 %	244	56,30				
6	УНТ 0,01 % + НТФ 30 % CNT 0.01 % + NPH 30 %	0	3,37	40,8	68,24		
7	УНТ 0,01 % + МФ 30 % CNT 0.01 % + MPH 30 %	5	4,03	39,6	66,53		
8	УНТ 0,1 % + НТФ 30 % CNT 0.1 % + NPH 30 %	0	1,34	35,6	62,84		6,38
9	УНТ 0,1 % + МФ 30 % CNT 0.1 % + MPH 30 %	0	5,41	32,6	64,72	43,60	
10	УНТ 0,5 % + НТФ 30 % CNT 0.5 % + NPH 30 %	4	1,76	35,4	64,25		
11	УНТ 0,5 % + МФ 30 % CNT 0.5 % + MPH 30 %	3	5,30	38,2	65,31		
12	НТФ 30 % + УНТ 0,02 % NPH 30 % + CNT 0.02 %	3	6,40	42,6	66,64		6,35
13	МФ 30 % + УНТ 0,02 % MPH 30 % + CNT 0.02 %	0	6,80	51,8	66,87		
14	Смесь (УНТ 1 % + НТФ 30 %) Mixture (CNT 1 % + NPH 30 %)	8	3,20	47,1	63,28	43,25	
15	Смесь (УНТ 1 % + МФ 30 %) Mixture (CNT 1 % + MPH 30 %)	8	2,28	40,4	61,41		7,23

Табл. 2. Результаты элементного анализа поверхности опытных образцов до и после горения
Table 2. Results of the elemental analysis of the surface of test samples before and after combustion

Покрытие Coating	Элементный состав поверхностного слоя до горения, % Elemental composition of the surface layer before combustion, %	Содержание фосфора в коксовом слое, % Phosphorus content in the char layer, %
УНТ 0,01 % + НТФ 30 % CNT 0.01 % + NPH 30 %	C – 54, P – 1,37	11,6
УНТ 0,01 % + МФ 30 % CNT 0.01 % + MPH 30 %	C – 57, P – 1,34	12,1
УНТ 0,1 % + НТФ 30 % CNT 0.1 % + NPH 30 %	C – 57, P – 1,34	11,8
НТФ 30 % + УНТ 0,02 % NPH 30 % + CNT 0.02 %	C – 45, P – 2,50	2,6
МФ 30 % + УНТ 0,02 % MPH 30 % + CNT 0.02 %	C – 50, P – 1,98	2,7
Смесь (УНТ 1 % + НТФ 30 %) Mixture (CNT 1 % + NPH 30 %)	C – 47, P – 4,40	10,7
Смесь (УНТ 1 % + МФ 30 %) Mixture (CNT 1 % + MPH 30 %)	C – 46, P – 4,90	8,9

На фотографиях (рис. 2–5) видно, что слой УНТ, прилегающий к подложке, равномерный на всех образцах. Второй слой, образованный фосфорорганическими соединениями, не имеет сплошности. В случае нанесения УНТ в качестве верхнего слоя покрытия, этот слой имеет более равномерную структуру. При покрытии образца смесью, содержащей взвесь УНТ в растворе фосфоновой кислоты, образуется более равномерное покрытие. Влияние УНТ на огнезащитные свойства разработанных систем заключается в создании равномерных слоев фосфорорганических соединений (ФОС), в данном случае фосфоновых кислот.

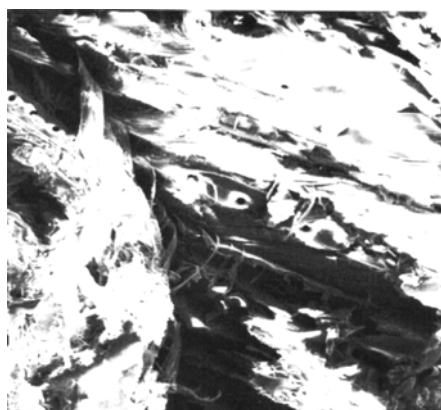


Рис. 2. Поверхность образца, модифицированного системой УНТ 0,01 % + НТФ 30 %

Fig. 2. The surface of the sample modified by the system of CNT 0.01 % + NPH 30 %

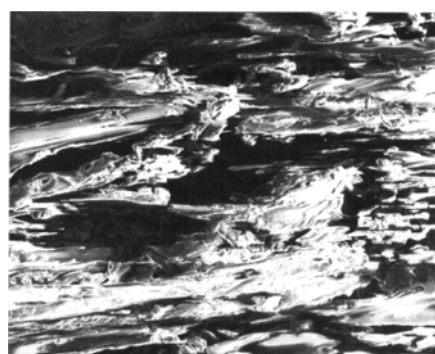


Рис. 3. Поверхность образца, модифицированного системой УНТ 0,1 % + НТФ 30 %

Fig. 3. The surface of the sample modified by the system of CNT 0.1 % + NPH 30 %

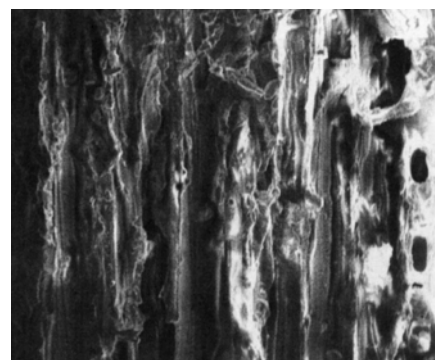


Рис. 4. Поверхность образца, модифицированного системой НТФ 30 % + УНТ 0,02 %

Fig. 4. The surface of the sample modified by the system of NPH 30 % + CNT 0.02 %



Рис. 5. Поверхность образца, модифицированного системой УНТ 1 % + НТФ 30 %

Fig. 5. The surface of the sample modified by the mixture of CNT 1 % + NPH 30 %

Качественные исследования разработанных покрытий показали, что они придают древесине биозащитные свойства [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Создана полифункциональная тонкослойная защитная система покрытия для древесины, состоящая из ФОС и УНТ, придающая древесине свойства огнестойкости, гидрофобности и несколько увеличивающая механическую прочность древесины поперек волокон.

Показано, что система из ФОС и УНТ эффективна при низких концентрациях нанотрубок, в интервале 0,1–0,5 %. При этом роль нанотрубок заключается в создании более равномерного покрытия.

Установлено, что система из ФОС и УНТ эффективна при расположении слоя УНТ на поверхности древесины и вышележащем слое ФОС.

Из исследованных систем покрытий наилучшим интегральным показателем полифункциональной защитной эффективности обладает состав УНТ 0,1 % + НТФ 30 %.

Результаты исследования могут быть использованы для придания деревянным конструкциям полифункциональных защитных свойств в практике домостроения и реставрационных работ

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалева С.А. Деревянные высотки в России — инновационный взгляд на современное строительство // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4–7 (46). С. 19–21. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.174
2. Deglise X. Weathering and protection of wood in buildings: the state of art // Forest complex in the digital economy: International Symposium. 2019. P. 31.
3. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. 262 с.
4. Wang S. Application of nanotechnology on the wood science and technology: challenges of our efforts // Forest complex in the digital economy: International Symposium. 2019. P. 57.
5. Покровская Е.Н. Получение биостойких материалов при поверхностной модификации древесины // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 636–640.
6. Papadopoulos A.N., Bikiaris D.N., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties: A Review // Nanomaterials. 2019. Vol. 9. Issue 4. P. 607. DOI: 10.3390/nano9040607
7. Айзеништадт А.М., Махова Г.А., Фролова М.А., Тутыгин А.С., Стенин А.А., Попова М.А. Проектирование состава нано- и микроструктурированных строительных композиционных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 14–18.
8. Рощина С.И., Шохин П.Б., Сергеев М.С. Исследование деревокомпозитных конструкций с применением углеродных нанотрубок // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 3 (333). С. 103–107.
9. Айзеништадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Основы термодинамики для строителей: конспект лекций. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2012. 79 с.
10. Портнов Ф.А. Гидрофобизация древесины эфирами фосфористой кислоты // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 167–171.
11. Зарубина Л.П. Защита зданий, сооружений и конструкций от огня и шума. Материалы, технологии, инструменты и оборудование. М. : Инфра-Инженерия, 2016. 336 с.
12. Степина И.В., Кляченко О.А. Взаимодействие с водой древесины сосны, модифицированной фенолборатами // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2013. № 4 (29). С. 6.
13. Стародубцева Т.Н., Аксомитный А.А. Уменьшение водопоглощения древесины с помощью пропитки и защитной поверхности полимера // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7–3 (18–3). С. 22–25. DOI: 10.12737/15111
14. Bjordal C.G. Microbial degradation of waterlogged archaeological wood // Journal of Cultural Heritage. 2012. Vol. 13. Pp. 118–122. DOI: 10.1016/j.cul-her.2012.02.003

15. Yu H., Liu F., Ke M., Zhang X. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 185. Pp. 324–330. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.005

16. Hoang D.Q., Pham T.L., Nguyen T.H., An H., Kim J. Organo-phosphorus flame retardants for poly(vinyl chloride)/wood flour composite // *Polymer Composites*. 2016. DOI: 10.1002/pc.24026

17. Evstigneev A.V., Smirnov V.A., Korolev E.V. Design of nanomodified intumescent polymer matrix

coatings: theory, modeling, experiments // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 01033. DOI: 10.1051/mateconf/201825101033

18. Pokrovskaya E.N. Research of bioproof materials at superficial modification of wood // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. P. 032047. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032047

19. Wang G., Bai S. Synergistic effect of expandable graphite and melamine phosphate on flame-retardant polystyrene // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 134. P. 45474. DOI: 10.1002/app.45474

Поступила в редакцию 13 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 14 января 2021 г.

Одобрена для публикации 14 января 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: Елена Николаевна Покровская — доктор технических наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 411335, Scopus: H-ind:1, ORCID: 0000-0001-9726-0084; elenapokrovskaya@bk.ru.

REFERENCES

1. Mikhaleva S.A. Wooden skyscraper in Russia — an innovative approach to modern construction. *International Research Journal*. 2016; 4-7(46):19-21. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.174 (rus.).

2. Deglise X. Weathering and protection of wood in buildings: the state of art. *Forest complex in the digital economy: International Symposium*. 2019; 31.

3. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Burning of Wood and its Flammable Properties*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of emergency situations of Russia. 2010; 262. (rus.).

4. Wang S. Application of nanotechnology on the wood science and technology: challenges of our efforts. *Forest complex in the digital economy: International Symposium*. 2019; 57.

5. Pokrovskaya E.N. Research of bioproof materials at superficial modification of wood. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 7:636-640. (rus.).

6. Papadopoulos A.N., Bikiaris D.N., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties: A review. *Nanomaterials*. 2019; 9(4):607. DOI: 10.3390/nano9040607

7. Aizenstadt A.M., Makhova G.A., Frolova M.A., Tutygin A.S., Stenin A.A., Popova M.A. Design of structure of nano- and microstructured composite construction materials. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:14-18. (rus.).

8. Roshchina S.I., Shokhin P.B., Sergeev M.S. Study of composite wood structures using carbon nanotubes. *Russian Forestry Journal*. 2013; 3:13-16. (rus.).

9. Eisenstadt M.A., Frolova M.A., Tutygin A.S. *Fundamentals of thermodynamics for builders: the abstract of lectures*. Arkhangelsk: CPC of NArFU, 2012; 79. (rus.).

10. Portnov F.A. Water-repellency treatment of wood with ethers of phosphorous acid. *Scientific Review*. 2015; 14:167-171. (rus.).

11. Zarubina L.P. *Protection of buildings, structures and structures from fire and noise. Materials, technologies, tools and equipment*. Moscow, Infra-Engineering, 2016; 336. (rus.).

12. Stepina I.V., Kleshenskova O.A. Interaction between pine wood modified by phenyl-borat and water. *Internet-Vestnik VolGASU*. 2013; 4(29):6. (rus.).

13. Starodubtseva T.N., Oxamitny A.A. Reduction of water absorption of wood by means of impregnation and protective polymer surface. *Actual directions of scientific researches of the XXI century: Theory and practice*. 2015; 3(7-3):(18-3):22-25. DOI: 10.12737/15111 (rus.).

14. Bjordal C.G. Microbial degradation of waterlogged archaeological wood. *Journal of Cultural Heritage*. 2012; 13:118-122. DOI: 10.1016/j.culher.2012.02.003

15. Yu H., Liu F., Ke M., Zhang X. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*. 2015; 185:324-330. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.005

16. Hoang D.Q., Pham T.L., Nguyen T.H., An H., Kim J. Organo-phosphorus flame retardants for

poly(vinyl chloride)/wood flour composite. *Polymer Composites*. 2016. DOI: 10.1002/pc.24026

17. Evstigneev A.V., Smirnov V.A., Korolev E.V. Design of nanomodified intumescent polymer matrix coatings: theory, modeling, experiments. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:01033. DOI: 10.1051/matec-conf/201825101033

18. Pokrovskaya E.N. Research of bioproof materials at superficial modification of wood. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019; 471:032047. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032047

19. Wang G., Bai S. Synergistic effect of expandable graphite and melamine phosphate on flame-retardant polystyrene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017; 134:45474. DOI: 10.1002/app.45474

Received November 13, 2020.

Adopted in revised form on January 14, 2021.

Approved for publication on January 14, 2021.

BIONOTES: **Elena N. Pokrovskaya** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Integrated Safety in Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 411335, Scopus: H-ind:1, ORCID: 0000-0001-9726-0084; elenapokrovskaya@bk.ru.

Модель процесса свободного растекания двумерного в плане водного потока за безнапорными отверстиями

В.Н. Коханенко¹, М.С. Александрова¹, А.И. Кондратенко²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова); г. Новочеркасск, Россия;

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство гидротехнических сооружений (ГТС) должно отвечать высоким требованиям надежности водопроводящих каналов, безнапорных труб, открытых водосбросов. Расчет ГТС необходимо выполнять с учетом динамических свойств воздействующего на них потока. Теория одномерных открытых потоков, используемая на практике, содержит некоторые общие указания без детального их рассмотрения. Использована теория двумерных плановых открытых течений, а именно метод характеристик, предложенный и развитый в работах И.А. Шеренкова.

Материалы и методы. В работах Б.Т. Емцева указано, что равномерный поток можно сопрячь с течением общего вида только с помощью промежуточного течения «простая волна», но подтверждения этого не приводится. Нами выделено и проанализировано в плоскости годографа течение общего вида. Затем определены характеристики первого семейства потока. Переход в физическую плоскость потока позволил определить координаты точек характеристик второго семейства, что дало возможность найти координаты точек крайней линии тока и определить ее геометрию.

Результаты. Предложенная математическая модель, которая при решении граничной задачи свободного растекания бурного, потенциального, двумерного в плане, открытого, стационарного водного потока при его безнапорном истечении в широкое горизонтальное гладкое русло позволила удовлетворить как системе уравнений движения потока, так и граничным условиям.

Выводы. Понятие течения общего вида (ранее неизвестное) и решение уравнений движения в плоскости годографа скорости помогли доказать теоретически возможность применения его в решении задачи свободного растекания потока. Получено простое аналитическое решение в плоскости годографа скорости. Теоретическое значение этой математической модели заключается в возможности поэтапного ее расширения для решения практических задач и усложнения от выявления основных закономерностей упрощенной модели потенциального потока, до практического использования результатов моделирования. Реализация методики в виде программы расчета поможет использовать ее проектировщиками ГТС. Это — первый этап решения задачи, который на следующих этапах позволит учесть силы сопротивления потоку.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бурный поток, течение «простая волна», математическая модель, свободное растекание, определение координат в физической плоскости, плоскость годографа, характеристики потока

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коханенко В.Н., Александрова М.С., Кондратенко А.И. Модель процесса свободного растекания двумерного в плане водного потока за безнапорными отверстиями // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 67–74. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.67-74

Simulation of the process of free spreading of a two-dimensional water flow behind pressure-free holes

Victor N. Kokhanenko¹, Mariya S. Aleksandrova¹, Anatolij I. Kondratenko²

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (SRSPU (NPI); Novocherkassk, Russian Federation;

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU – MTAA); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Construction of hydraulic structures must meet high reliability requirements applicable to water supply channels, free-flow pipes, and open spillways. Any analysis of hydraulic structures must take account of the dynamic properties of flows that the structures accommodate. The theory of one-dimensional free flows, used in practice, has a number of general guidelines, but lack any details. The co-authors take advantage of the theory of two-dimensional free flows, namely, the method of characteristics proposed and developed in the works of I.A. Sherenkov.

Materials and methods. In her works, B.T. Emtseva suggests that a uniform flow can be coupled with a general flow only with the help of an intermediate “simple wave” flow, but this statement has no proof. We identified and analyzed a general flow in the plane of the hodograph. Thereafter, characteristics of the first family of the flow were determined. A transition to the physical plane of the flow allowed to determine the coordinates of the points of characteristics of the second family. This allowed to find the coordinates of the points of the extreme streamline and to determine its geometry.

Results. The proposed mathematical model complied with the system of equations, describing the flow, and the boundary conditions when it was applied to the boundary problem of the free spreading of a stormy, potential, two-dimensional in plan, free, stationary water flow and its free inflow into a wide horizontal smooth channel.

Conclusions. The concept of a general flow (previously unknown) and equations of motion in the plane of the velocity hodograph made it possible to theoretically prove its applicability to the problem of free flow spreading. A simple analytical solution is obtained in the plane of the velocity hodograph. The theoretical significance of this mathematical model consists in the possibility of its step-by-step application to practical problems and its complication from the identification of the main regularities of a simplified model of a potential flow to the practical use of simulation results. The implementation of the methodology in the form of software will make it usable by designers of hydraulic structures. This is the first stage of problem solving, and at further stages resistance will be taken into account.

KEYWORDS: turbulent flow, simple wave flow, mathematical model, free spreading, determination of coordinates in the physical plane, hodograph plane, flow characteristics

FOR CITATION: Kokhanenko V.N., Aleksandrova M.S., Kondratenko A.I. Simulation of the process of free spreading of a two-dimensional water flow behind pressure-free holes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):67-74. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.67-74 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве гидротехнических сооружений (ГТС) предъявляются высокие требования к обеспечению надежности водопроводящих каналов, безнапорных труб, открытых водосбросов. Расчет таких сооружений необходимо выполнять с учетом динамических свойств воздействующего на них потока. Теория одномерных открытых потоков, используемая на практике, содержит общие указания по расчету параметров потоков без детального их рассмотрения и не учитывает особенности бурных потоков при значительном изменении числа Фруда. В статье использована теория двумерных плановых открытых течений, а в виртуальной и физической плоскости — для расчета характеристик потока, основанная на предложенном и развитом в работах методе И.А. Шеренкова. Цель исследования — создание модели процесса свободного растекания потока с исключением недостатков моделей, разработанных в трудах В.Н. Коханенко [1] и его более ранних монографиях.

Актуальность работы подтверждается широкой известностью в технической и справочной литературе по гидравлике двумерных в плане потоков задачи свободного растекания водного потока за безнапорными трубами [2, 3], которая решается с использованием графика, предложенного И.А. Шеренковым [4, 5]. Ранее проведенный нами анализ отдельных вопросов расчета параметров двумерных потоков [6–8] позволил переосмыслить и критически пересмотреть цель переработки и совершенствования существующих моделей. Это даст возможность повысить адекватность модели результатами, полученными экспериментально, и приблизить ее к реальному процессу при свободном растекании водного потока.

Из иностранных исследователей следует упомянуть ряд авторов [9–14], проводивших лабораторные и натурные опыты на оросительных системах, в том числе с турбулентными потоками, и использовавших численные методы для их рас-

чета. Важным выводом из этих работ является то, что водные потоки оказывают разрушительное действие на плодородный слой земли при появлении протечек в системе. Для снижения негативного воздействия водных потоков проводятся исследования по применению геотекстильных материалов для укрепления русел и берегов каналов [15–17].

Данная работа посвящена аналитическому расчету параметров водного потока, используемых для определения размеров водопропускных и водосбросных каналов. Для спокойных потоков расчет параметров потенциального движения выполнила Е.А. Дуванская [18–20]. Н.Г. Папченко для решения практических задач гидравлики двумерных в плане стационарных бурных водных потоков аналитическим методом использовала плоскость годографа скорости [21], однако для исключения разрыва функции потока применен искусственный метод, и прямолинейная грань трубы была заменена на дугу.

В нашем решении из общей теории двумерных в плане бурных потенциальных открытых водных потоков [3, 8] использовано утверждение, что равномерный поток можно сопрячь с течением общего вида только с помощью промежуточного течения «простая волна». Следовательно, схема свободного растекания бурного двумерного в плане потока будет следующей (рисунок).

На схеме равномерный поток I сопрягается с течением общего вида III посредством простой волны II.

Область равномерного потока ограничена прямолинейными характеристиками второго семейства A_0M_0 и A'_0M_0 , где M_0 — крайняя точка равномерного потока вниз по течению потока.

Течение общего вида ограничено характеристиками первого семейства M_0M_n , $M'_0M'_n$.

Простая волна II примыкает к течению общего вида и ограничена сверху свободной границей течения потока A_0M_n .

Течение общего вида III является модифицированным радиальным потоком, в котором учи-

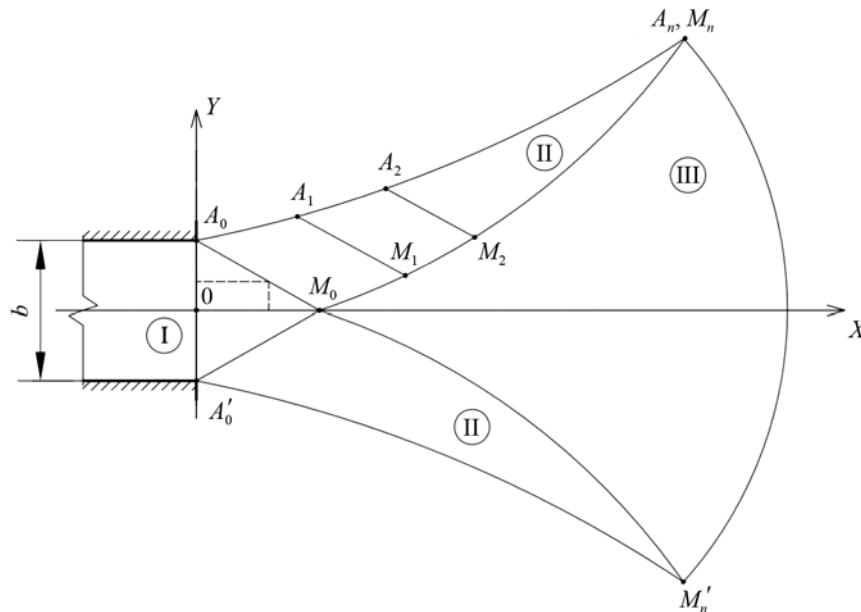


Схема сопряжения потоков при его свободном растекании в широкое отводящее русло
The confluence of flows and free spreading into a wide downstream channel

тывается выпуклость потока вверх с экстремумом по оси симметрии X . Эта выпуклость наблюдалась нами в опытах и объясняется тем, что глубина потока по оси симметрии уменьшается медленнее, чем в точках, близких к крайней линии тока.

Приведенная схема позволяет не противоречить общим выводам по теории двумерных в плане потенциальных потоков, а также обойти ранее имеющиеся нестыковки в граничных условиях задачи с течением общего вида (без простой волны).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель течения общего вида

В качестве течения общего вида выбираем аналитическое решение в плоскости годографа скорости [1, 7] в виде:

$$\psi(\tau, \theta) = A \frac{\sin \theta}{\tau^{\frac{1}{2}}}; \quad \varphi(\tau, \theta) = A \frac{h_0}{H_0} \cdot \frac{\cos \theta}{\tau^{\frac{1}{2}}(1-\tau)}, \quad (1)$$

где $\psi(\tau, \theta)$ — функция тока; $\varphi(\tau, \theta)$ — потенциальная функция; τ — независимый параметр в плоскости годографа скорости;

$$\tau = \frac{V^2}{2gH_0}, \quad (2)$$

где V — величина местной скорости потока; H_0 — постоянная в интеграле Д. Бернулли.

Так как равномерный поток по инерции распространяется в зону I, то существовавшая ранее особенность решения [7] устраняется (будет показано далее).

Формулировка особенности (нестыковки) при решении задачи без учета простой волны

Для любой линии тока (кроме оси симметрии), которая выходит из трубы, где $\theta = 0$ при $\tau_0 \neq 0$ условие

$$A \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} = \text{const} \quad (3)$$

не выполняется, поскольку линия тока отсекает расход потока, в общем не равный нулю.

Условие (3) также не выполняется, если со схемы на рисунке убрать простую волну, так как на выходе потока из трубы вдоль крайней линии тока $\theta = 0$, а $\tau_0 \neq 0$.

Заметим, что решение (1) удовлетворяет базовой системе уравнений в виртуальной плоскости годографа скорости [7, 22]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{h_0}{2H_0} \cdot \frac{3\tau-1}{\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = 2 \frac{h_0}{H_0} \cdot \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{1}{3} < \tau_0 \leq \tau \leq 1.$$

Из анализа решения, к примеру, для линии тока, видно, что, чем ближе проходит линия тока к оси симметрии потока, тем меньше будут угол θ и параметр τ . Следовательно, глубина потока $h = H_0(1-\tau)$ будет возрастать к оси симметрии и убывать от оси симметрии в сторону свободной границы потока. Это видно из анализа изменения τ , θ вдоль фиксированной линии тока $\psi(\tau, \theta) = \text{const} = C_1$ и вдоль фиксированной эквипотенциали $\varphi(\tau, \theta) = C_2$, считая, что, двигаясь к оси симметрии потока, угол θ уменьшается.

Поскольку этот факт подтверждается как натурными наблюдениями, так и экспериментальными исследованиями по свободному растеканию потенциального потока, то решение (1) вполне подходит в качестве решения общего вида для рассматриваемой в работе задачи.

Определение параметров θ , τ в плоскости годографа скорости вдоль характеристики первого семейства

Характеристики первого семейства в плоскости годографа скорости имеют вид (согласно [23]):

$$\theta = f(\tau) + C_1,$$

где

$$f(\tau) = \sqrt{3} \cdot \arctg \sqrt{\frac{3\tau-1}{3(1-\tau)}} - \arctg \left(\sqrt{\frac{3\tau-1}{1-\tau}} \right) + C_1. \quad (5)$$

Из условия прохождения характеристики (5) через точку M_0 (см. рис.) с параметрами $\tau = \tau_0$, $\theta = 0$ определяется постоянная C_1 :

$$C_1 = \arctg \sqrt{\frac{3\tau_0-1}{1-\tau_0}} - \sqrt{3} \cdot \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3\tau_0-1}{1-\tau_0}} \right), \quad (6)$$

$$\text{где } \tau_0 = \frac{V_0^2}{2gH_0}, \quad (7)$$

где V_0 , h_0 — скорость и глубина потока на его выходе из трубы; $H_0 = \frac{V_0^2}{2g} + h_0$ — постоянная в интеграле Д. Бернулли [24]:

$$\frac{V_0^2}{2g} + h = H_0. \quad (8)$$

Для определения θ , τ вдоль характеристики решаем уравнение (5). Можно задаться произвольным τ из интервала $\tau \in (\tau_0, 1)$ и из (5) определять θ . При этом при $\tau = 1$, $\theta = \theta_{\max}$:

$$\theta_{\max} = C_1 + (\sqrt{3} - 1) \frac{\pi}{2}. \quad (9)$$

где $\theta_{\max}$ — максимальный угол растекания потока вдоль свободной верхней границы потока.

При увеличении

$$\tau \rightarrow 1; h = H_0(1 - \tau) \rightarrow 0;$$

$$V \rightarrow V_{\max} = \sqrt{2gH_0}; \theta \rightarrow \theta_{\max}.$$

При $\tau \rightarrow 1$ поток приближается к радиальному.

Переход в физическую (план течения потока) плоскость течения потока

Связь между планом течения потока (плоскость OXY) и плоскостью годографа скорости (τ , θ) осуществляется с использованием дифференциальной, комплексной формулы:

$$d(x + iy) = \frac{1}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0}} \left(d\varphi + i \frac{h_0}{H_0(1-\tau)} d\psi \right) e^{i\theta}, \quad (10)$$

где $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Пользуясь формулой (10), можно, двигаясь в плане течения потока вдоль линии тока $d\psi = 0$, пользоваться формулами, вытекающими из (10):

$$\begin{cases} dx = \frac{d\varphi \cos \theta}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0}}; \\ dy = \frac{d\varphi \sin \theta}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0}}. \end{cases} \quad (11)$$

Так как вдоль произвольной линии тока справедливо согласно выражению (1) $d\psi = 0$, то справедливо уравнение $d\left(\frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}}\right)$ или связь между параметрами τ , θ :

$$\cos \theta d\theta - \frac{1}{2} \frac{\sin \theta}{\tau^{3/2}} d\tau = 0. \quad (12)$$

Из формулы (1) также следует:

$$\frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} = K \sin \theta_{\max}, \quad (13)$$

где K — коэффициент расхода, отсекаемый данной линией тока от оси симметрии, $0 \leq K \leq 1$.

Определим также дифференциал $d\varphi$ со второго из равенств (1). В результате получим:

$$d\varphi = A \frac{h_0}{H_0} \left\{ -\frac{\sin \theta d\theta}{\tau^{1/2}(1-\tau)} - \frac{1}{2} \frac{\cos \theta (1-3\tau) d\tau}{\tau^{1/2}(1-\tau)^2} \right\}. \quad (14)$$

Исключив в формуле (11) с помощью выражений (12)–(14) переменную θ (т.е. выразив θ через τ и $d\theta$ через $d\tau$), получим следующие обыкновенные дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными [23]:

$$\begin{cases} dx = \frac{d\varphi(\tau) \cos \theta(\tau)}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0}}; \\ dy = \frac{d\varphi(\tau) \sin \theta(\tau)}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0}}, \end{cases} \quad (15)$$

которые решаются интегрированием [25]:

$$\begin{cases} x - x_0 = \Phi_1^*(\tau) \Big|_{\tau_0}^{\tau}; \\ y - y_0 = \Phi_2^*(\tau) \Big|_{\tau_0}^{\tau}, \end{cases} \quad (16)$$

где Φ_1^* , Φ_2^* — первообразные при взятии интегралов; x_0 , y_0 — координаты точки в плане течения потока, через которую проходит рассматриваемая линия тока с параметром τ_0 и расходом, определяемым K .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим результат определения координат точки пересечения характеристики первого семейства с линиями тока течения общего вида (1) с учетом выполненных преобразований.

Уравнение линии тока в плоскости годографа скорости имеет вид:

$$\frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} = K \sin \theta_{\max}, \quad (17)$$

где K — коэффициент расхода, отсекаемый данной линией тока от оси симметрии потока.

Уравнение характеристики первого семейства в плоскости годографа скорости имеет вид:

$$\theta = f(\tau) + C_1. \quad (18)$$

Докажем, что можно определить коэффициент расхода K в точке пересечения линии тока и характеристики первого семейства.

Исключим из уравнений (17), (18) угол θ . В результате получим уравнение относительно K :

$$\frac{\sin \{f(\tau) + C_1\}}{\tau^{1/2}} = K \sin \theta_{\max}; \quad (19)$$

$$K = \frac{\sin \{f(\tau) + C_1\}}{\tau^{1/2} \sin \theta_{\max}}. \quad (20)$$

Установив таким образом коэффициент расхода K и параметры θ , τ , вдоль линии тока можно по алгоритму в предшествующем пункте определить координаты точки M в плане потока, принадлежащей характеристике и линии тока.

Вычисление параметров потока внутри области III выполняется по алгоритму [7].

К примеру, на оси симметрии потока необходимо определить параметры потока $\tau_{\text{оси}}$, $\theta = 0$ и абсциссу X . Проведем эквипотенциаль через точку M :

$$A \frac{h_0}{H_0} \frac{\cos \theta}{\tau^{1/2} (1-\tau)} = A \frac{h_0}{H_0} \frac{\cos \theta}{\tau_m^{1/2} (1-\tau_m)}. \quad (21)$$

Полагая в уравнении (21) $\theta = 0$, получим кубическое уравнение для определения $\tau_{\text{оси}}$:

$$\frac{\cos \theta_m}{\tau_m^{1/2} (1-\tau_m)} = \frac{1}{\tau^{1/2} (1-\tau)}. \quad (22)$$

Корень уравнения (22), удовлетворяющий условию $\tau_0 < \tau < 1$, будет искомым.

Далее, пользуясь связью (11), возможно определить и абсциссу точки $M_{\text{оси}}$ пересечения эквипотенциали с осью симметрии потока.

Таким образом, для любой точки M можно провести эквипотенциаль и произвольные линии тока внутри области III и рассчитать как сами параметры τ , θ в точках их пересечения, так и координаты точек пересечения.

Характеристики второго семейства $A_0M_0, A_1M_1, \dots, A_kM_k$ определяются по значениям координат в точках $M_i(x_i, y_i)$ и волновыми углами α_i в точках пересечения характеристики первого семейства с линиями тока течения общего вида:

$$\alpha_i = \arcsin \sqrt{\frac{1-\tau_i}{2\tau_i}}.$$

Геометрия крайней линии тока устанавливается из условия, что вдоль нее угол θ равен углу θ_x на характеристике первого семейства. На характеристике второго семейства A_iM_i параметры потока постоянны.

В зоне равномерного потока параметры потока не изменяются, т.е. равны V_0, h_0 .

Уравнение характеристики второго семейства A_0M_0 рассчитывается по параметру τ_0 в точке M_0

и волновому углу $\alpha_0 = \arcsin \sqrt{\frac{1-\tau_0}{2\tau_0}}$. Точка A_0 опре-

деляется как точка пересечения характеристики M_0A_0 с продолжением боковой стенки трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании приведенной модели свободного растекания двухмерного водного потока за безнапорными отверстиями можно сформулировать следующие выводы:

- из модели, предложенной в работе, следует, что можно в граничной задаче свободного растекания бурного, потенциального, двухмерного в плане, открытого, стационарного водного потока при его безнапорном истечении в широкое горизонтальное гладкое русло удовлетворить как системе уравнений движения потока, так и граничным условиям;

- ввод в модель связующего течения «простая волна» позволяет корректно поставить и решить граничную задачу;

- использованное в качестве течения общего вида [7] решение системы (1) в плоскости годографа скорости (2) имеет вид:

$$\psi(\tau, \theta) = A \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}}; \quad \varphi(\tau, \theta) = A \frac{h_0}{H_0} \frac{\cos \theta}{\tau^{1/2} (1-\tau)},$$

что позволило доказать теоретически возможность использования его в решении задачи свободного растекания потока;

- разработка программ для расчета ПК будет продолжена авторами далее в рамках требований к кандидатской диссертации по специальности «Математическое моделирование».

Дальнейшие исследования растекания двухмерного водного потока авторы видят в написании программы для определения всех параметров потока, доведенной до инженерного уровня. Реализация методики в виде программы расчета позволит использовать ее проектировщиками ГТС. Это — первый этап решения задачи, который в последующем даст возможность учесть силы сопротивления потоку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коханенко В.Н., Бурцева О.А., Александрова М.С. Двухмерный в плане вихреисточник // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 2. С. 44–48. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-44-48
2. Высоцкий Л.И. Управление бурными потоками на водосбросах. М. : Энергия, 1977. 280 с.
3. Емцев Б.Т. Двухмерные бурные потоки. М. : Энергия, 1967. 212 с.
4. Шеренков И.А. Расчет растекающегося бурного потока за выходными оголовками водопропускных сооружений // Труды объединенного семинара по гидроэнергетическому и водохозяйственному строительству. Харьков, 1958. Вып. 1.
5. Волченков Г.Я. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений. М. : Транспорт, 1992. 407 с.
6. Kokhanenko V.N., Burtseva O.A., Alexandrova M.S. Two-dimensional plan source, vortex and vortex source // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1029. P. 012023. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012023
7. Kondratenko A.I., Alexandrova M.S. Estimation of a motion equations system of a potential two-dimensional in a water flow plan to dimensionless form // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012122. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012122
8. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Сопряжение двух равномерных потоков // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 4. С. 83–86. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-83-86
9. Aldungarova A., Sarabekova U., Zhusupbekov A., Tanaka T., Tanzharikov P. The influence of experimental studies on the stability of hydraulic structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012113. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012113
10. Krutov A., Choriev R., Norkulov B., Mavlyanova D., Shomurodov A. Mathematical modelling of bottom deformations in the kinematic wave approximation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012147. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012147
11. Kuchkarova D., Achilova D. Model of rain-water runoff formation on the surface of complex topography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012107
12. Qosimov J., Nasritdinova U., Nasritdinov A. Dynamic and kinematic conditions for designing water channels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012118. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012118
13. Shaazizov F. Studies of turbulent flow characteristics of dividing open water streams // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012141. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012141
14. O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // Journal of Hydraulic Engineering. 1993. Vol. 119. Issue 2. Pp. 244–261. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1993)119:2(244)
15. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Design of impervious coatings with enhanced reliability made from innovative materials // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1503–1509. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.096
16. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Efficiency and durability of the linings channels of geosynthetics // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 96 (4). Pp. 42–59. DOI: 10.18720/MCE.96.4
17. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Water permeability of the polymer screen with a system of slits of hydraulic structures // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 83 (7). Pp. 148–164. DOI: 10.18720/MCE.83.14
18. Дуванская Д.В. Современные методы расчета дорожных водопропускных сооружений // Экология, технология и оборудование : сб. науч. тр. Ростов н/Д., 2001. С. 94–98.
19. Дуванская Д.В. Аналитическое решение задачи сопряжения открытых спокойных потоков воды при их расширении // Экология, технология и оборудование : сб. науч. тр. Ростов н/Д., 2002. С. 67–74.
20. Дуванская Д.В. Существо аналитического метода решения практических задач открытых плановых потоков с использованием вспомогательной плоскости годографа скорости потока // Мелиорация антропогенных ландшафтов : сб. науч. тр. Новочеркасск, 2002. С. 52–56.
21. Папченко Н.Г. Общая технология решения практических задач гидравлики двухмерных в плане стационарных бурных водных потоков аналитическим методом с использованием плоскости годографа скорости // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2014. № 2. С. 162–166.
22. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Метод решения граничных задач по течению двухмерных в плане потенциальных потоков с использованием преобразования С.А. Чаплыгина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 4 (208). С. 19–22. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-4-19-22
23. Александрова М.С. Метод аналогий между гидравликой двухмерных в плане водных потоков и газовой динамикой // Строительство и архитекту-

ра. 2020. Т. 8. № 2. С. 49–52. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-49-52

24. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М. : Колос, 2005. 656 с.

25. Липанов А.М., Кисаров Ю.Ф., Ключников И.Г. Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков. Екатеринбург : УрО РАН, 2001. 160 с.

Поступила в редакцию 15 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 21 января 2021 г.

Одобрена для публикации 21 января 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Николаевич Коханенко** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общинженерных дисциплин; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова)**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 354353; kokhanenkovn@mail.ru;

Мария Сергеевна Александрова — аспирант кафедры общинженерных дисциплин; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова)**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 1086791; e_masha@mail.ru;

Анатолий Иванович Кондратенко — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерных конструкций; **Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева)**; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; РИНЦ ID: 1066468; ai_kondratenko@mail.ru.

REFERENCES

1. Kokhanenko V.N., Burtseva O.A., Alexandrova M.S. Two-dimensional vortex source. *Construction and Architecture*. 2020; 8(2):44-48. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-44-48 (rus.).
2. Visotckij L.I. *Management of stormy streams at spillways*. Moscow, Energiya Publ., 1990; 280. (rus.).
3. Yemtsev B.T. *Two-dimensional stormy streams*. Moscow, Energiya Publ., 1967; 212. (rus.).
4. Sherenkov I.A. The calculation of the spreading of the turbulent flow over the outlet ends of culverts. *Proceedings of the Joint Workshop on Hydropower and Water Management*. Kharkov, 1958; 1. (rus.).
5. Volchenkov G.Ya. *Hydraulic Calculation Guide for Small Culverts*. Moscow, Transport, 1992; 408. (rus.).
6. Kokhanenko V.N., Burtseva O.A., Alexandrova M.S. Two-dimensional plan source, vortex and vortex source. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1029:012023. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012023
7. Kondratenko A.I., Alexandrova M.S. Estimation of a motion equations system of a potential two-dimensional in a water flow plan to dimensionless form. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012122. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012122
8. Kokhanenko V.N., Aleksandrova M.S. Coupling of two uniform flows. *Construction and Architecture*. 2020; 8(4):83-86. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-83-86 (rus.).
9. Aldungarova A., Sarabekova U., Zhusupbekov A., Tanaka T., Tanzharikov P. The influence of experimental studies on the stability of hydraulic structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012113. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012113
10. Krutov A., Choriev R., Norkulov B., Mavlyanova D., Shomurodov A. Mathematical modelling of bottom deformations in the kinematic wave approximation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012147. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012147
11. Kuchkarova D., Achilova D. Model of rainwater runoff formation on the surface of complex topography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012107. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012107
12. Qosimov J., Nasritdinova U., Nasritdinov A. Dynamic and kinematic conditions for designing water channels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012118. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012118
13. Shaazizov F. Studies of turbulent flow characteristics of dividing open water streams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012141. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012141
14. O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1993; 119(2):244-261. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1993)119:2(244)
15. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Design of impervious coatings with enhanced reliability made from innovative materials. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1503-1509. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.096
16. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Efficiency and durability of the linings channels of geosynthe-

tics. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 96(4):42-59. DOI: 10.18720/MCE.96.4

17. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Water permeability of the polymer screen with a system of slits of hydraulic structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 83(7):148-164. DOI: 10.18720/MCE.83.14

18. Duvanskaya D.V. Modern methods of calculating road culverts. *Ecology, Technology and Equipment : Collection of Scientific Papers*. Rostov-on-Don, 2001; 94-98. (rus.).

19. Duvanskaya D.V. Analytical solution of the problem of conjugation of open calm water flows during their expansion. *Ecology, Technology and Equipment : Collection of Scientific Papers*. Rostov-on-Don, 2002; 67-74. (rus.).

20. Duvanskaya D.V. The essence of the analytical method for solving practical problems of open planned flows using the auxiliary plane of the flow velocity hodograph. *Melioration of Anthropogenic Landscapes : Collection of Scientific Papers*. Novocherkassk, 2002; 52-56. (rus.).

21. Papchenko N.G. The general technology of solving practical problems of hydraulics of two-dimen-

sional in terms of stationary turbulent water flows analytical method using the hodograph plane speed. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2014; 2:162-166. (rus.).

22. Kokhanenko V.N., Aleksandrova M.S. Method for solving boundary value problems for two-dimensional flow in terms of potential flows using the transformation S.A. Chaplygin. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2020; 4(208):19-22. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-4-19-22 (rus.).

23. Aleksandrova M.S. Method of analogies between hydraulics of two-dimensional water flows and gas dynamics. *Construction and Architecture*. 2020; 8(2):49-52. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-49-52 (rus.).

24. Schterelicht D.V. *Hydraulics*. Moscow, Kolos Publ., 2005; 656. (rus.).

25. Lipatov A.M., Kirsanov Yu.V., Klyuchnikov I.G. *Numerical experiment in classical hydro-mechanics of turbulent flows*. Ekaterinburg, UrO RAN, 2001; 162. (rus.).

Received December 15, 2020.

Adopted in revised form on January 21, 2021.

Approved for publication on January 21, 2021.

B I O N O T E S: **Victor N. Kokhanenko** — Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of General Engineering Disciplines; **Platov South-Russian State Polytechnic University (SRSPU (NPI))**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RISC: 354353; kokhanenkovn@mail.ru;

Mariya S. Aleksandrova — postgraduate of the Department of General Engineering Disciplines; **Platov South-Russian State Polytechnic University (SRSPU (NPI))**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RISC: 1086791; e_masha@mail.ru;

Anatolij I. Kondratenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Structures; **Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU – MTAA)**; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; ID RISC: 1066468; ai_kondratenko@mail.ru.

Исследование влияния высокочастотного циклического нагружения на структуру и свойства сварных соединений технологических трубопроводов

Е.А. Гридасова, М.А. Середа, Ш.Ш. Закиров угли

Дальневосточный федеральный университет (ДФУ); г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Эксплуатация трубопроводных систем сопровождается рядом условий, которые приводят к резкому снижению их долговечности, а именно благодаря возникновению переменных низкочастотных и высокочастотных нагрузок, свойственных технологическому трубопроводу из-за динамического режима работы, обусловленного наличием компрессорных установок, происходит усталостное разрушение, приводящее к отказу трубопровода. На этапе монтажа участки технологических трубопроводов соединяют между собой путем создания сварного соединения. Протекание термического цикла сварки зачастую негативно влияет на свойства материала в условиях усталостного нагружения. Представляет интерес исследование сварных соединений трубопроводной стали под действием вибраций высоких частот, определение влияния дефектности сварного шва на характеристики долговечности.

Материалы и методы. Выбрана трубопроводная низкоуглеродистая сталь СТ20. Использованы радиографический метод контроля, оптическая металлография, микротвердость структурных фаз и метод усталостных высокочастотных испытаний.

Результаты. Представлены результаты и выводы о влиянии дефектов сварных соединений на характеристики долговечности сварных образцов из трубопроводной стали при высокочастотных усталостных испытаниях, проанализированы структурные изменения в сварном соединении методами оптической металлографии и микротвердости. Посредством радиографического контроля определены дефекты сварного шва, их размеры. Приведен сравнительный анализ пределов выносливости основного металла (ОМ) модельного материала и его сварного соединения с выявленными дефектами и без дефектов сварного шва. Установлены главные причины разрушения сварных соединений под действием вибраций высоких частот.

Выводы. Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что высокочастотные вибрации оказывают негативное влияние на ОМ технологического трубопровода и на сварные соединения из него. Местом разрушения является именно сварной шов, а активаторами процесса разрушения — наличие дефектов, причем влияние на усталостные характеристики оказывают не размер и типология дефекта, а его наличие. Характеристики долговечности при высоких частотах нагружения сварного соединения в гигацикловой области на 67 % ниже по сравнению с ОМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологические трубопроводы, высокочастотные вибрации, сварные соединения, усталостная прочность, дефекты сварных соединений, оптическая металлография, микротвердость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гридасова Е.А., Середа М.А., Закиров угли Ш.Ш. Исследование влияния высокочастотного циклического нагружения на структуру и свойства сварных соединений технологических трубопроводов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 75–90. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.75-90

A study of the influence of high frequency cyclic loading on the structure and properties of weld connections in process pipelines

Ekaterina A. Gridasova, Maria A. Sereda, Shokhrukh S. Zakirov ugli

Far Eastern Federal University (FEFU); Vladivostok, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Pipeline systems are exposed to several conditions that lead to a drastic reduction in their durability, primarily due to variable low-frequency and high-frequency loads arising in a process pipeline due to the operation of compressor units. Hence, fatigue failure occurs, leading to the pipeline failure. As early as at the pipeline installation stage, sections of process pipelines have weld connections, and thermal welding cycles have an adverse effect on the properties of materials exposed to fatigue loading. The study of weld connections in steel pipelines exposed to high-frequency vibrations and effects of weld seam defects on durability characteristics are the focus of this research.

Materials and methods. Low-carbon pipeline steel St20 was selected for the study. The radiographic inspection method, optical metallography, microhardness of structural phases, and the method of high-frequency fatigue tests were used.

Results. The results and principal conclusions about the effect of welding defects on durability characteristics of welded samples, made of pipeline steel and exposed to high-frequency fatigue tests, are presented; structural changes in weld connections are analyzed using optical metallography and microhardness methods. Defects of weld seams and their dimensions were identified by means of radiographic inspection. A comparative analysis of durability limits, demonstrated by the parent metal of the model material that has defective weld connections, and the same limits of defect-free samples is provided. The main causes of failure of weld joints, exposed to high-frequency vibrations, are identified.

Conclusions. Having summarized the research findings, we can argue that high-frequency vibrations have a negative impact on the parent metal of a process pipeline and its weld joints. The weld seam is the point of failure; defects trigger destruction, and their presence has a higher impact on fatigue characteristics than their dimensions or types. Characteristics of durability in case of exposure to high frequency loading applied to a weld joint in the gigacycle range are 67 percent below those of the parent metal.

KEYWORDS: process pipelines, high-frequency vibrations, weld joints, fatigue strength, weld joint defects, optical metallography, microhardness

FOR CITATION: Gridasova E.A., Sereda M.A., Zakirov ugli Sh.S. A study of the influence of high frequency cyclic loading on the structure and properties of weld connections in process pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):75-90. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.75-90 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Системы технологических трубопроводов относятся к техническим устройствам, применяемым на опасных производственных объектах. На сегодняшний день известно, что эксплуатация трубопроводных систем сопровождается рядом условий, которые приводят к резкому снижению их долговечности, а именно благодаря возникновению переменных низкочастотных и высокочастотных нагрузок, свойственных технологическому трубопроводу из-за динамического режима работы, обусловленного наличием компрессорных установок, происходит усталостное разрушение, ведущее к отказу трубопровода.

Динамическое поведение трубопроводов связано как с внутренними воздействиями, так и с внешними. Внутренними являются работа компрессорных станций, пульсации при перемещении прокачиваемого продукта, температурные перепады в различных частях системы и т.д. Внешние воздействия особенно важны для наземных трубопроводов, к ним могут быть отнесены ветровые, гололедные, сейсмические и микросейсмические нагрузки и др. Значительное влияние на частотные

характеристики состояния и поведения трубопровода оказывают собственные колебания. Агрегирование внешних, внутренних воздействий и собственных колебаний позволит лучше представить динамическое поведение конструкций трубопроводов и факторы, влияющие на материал конструкции в течение всего жизненного цикла (ЖЦ). На рис. 1 представлен технологический трубопровод с несущей металлической конструкцией из вант и поддерживающей фермы через р. Трубезь в г. Переславль-Залесский Ярославской области.

На этапе монтажа участки технологических трубопроводов соединяют между собой путем сварного соединения. Термический цикл сварки зачастую негативно влияет на свойства материала в условиях усталостного нагружения: исследования показывают, что дефекты сварных соединений, такие как поры, микротрещины и включения, в этом случае выступают в качестве дополнительных источников зарождения усталостных трещин в материале [1–3]. Изучение условий эксплуатации технологических трубопроводных систем показало, что большая часть из них подвергается высокочастотному вибрационному нагружению со стороны примыкающего насосно-компрессорного оборудо-



Рис. 1. Технологический трубопровод с несущей металлической конструкцией из вант и поддерживающей фермы через р. Трубезь в г. Переславль-Залесский Ярославской области

Fig. 1. A process pipeline, a bearing cable-stayed structure made of metal, and a support truss over the Trubezh River in Pereslavl-Zalessky, Yaroslavl Region

вания [4–6]. При анализе влияния дефектов сварного шва на механические свойства конструкционных углеродистых сталей было доказано, что наличие шлаковых включений, пор, непроваров, подрезов, нарушений геометрии шва уменьшает значения пределов прочности и текучести сварного соединения, что, в свою очередь, приводит к значительному сокращению предела выносливости в высокочастотном режиме [7–10]; результаты многих работ свидетельствуют о том, что зарождение усталостных трещин чаще всего происходит на участках, содержащих указанные дефекты [11–21]. Так, например, в труде [22] изучалось воздействие высокочастотных вибраций на усталостные характеристики низколегированной стали, а именно околошовной зоны сварного соединения, посредством циклических испытаний с частотой 20 кГц при симметричном цикле нагружения (коэффициент асимметрии $R = -1$). Выяснилось, что под влиянием термического цикла сварки произошло снижение предела выносливости металла на 50–60 % по сравнению с основным металлом. Выявлено, что возникновение усталостной трещины могло произойти по причине ухудшения механических свойств, а также изменения микроструктуры стали вследствие воздействия местного источника тепла в процессе сварки. Полученные в результате испытания усталостные характеристики материала представлены на рис. 2.

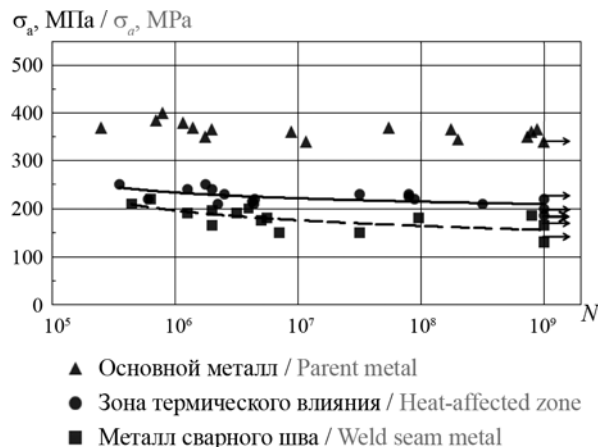


Рис. 2. Усталостные характеристики металла околошовной зоны [23]

Fig. 2. Fatigue characteristics of metal in the heat-affected zone [23]

В рамках работы [24] было проведено исследование влияния дефектов сварных соединений конструкционной стали Q345 (химический состав, %: С 0,15; Si 0,38; Mn 1,36; Р не более 0,012; S не более 0,03) на ее усталостные характеристики в высокочастотном режиме. Предел прочности данного материала равен 570 МПа, предел текучести — 420 МПа. В результате проведенных усталостных ис-

пытаний на Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц при симметричном цикле нагружения (коэффициент асимметрии $R = -1$) оказалось, что значение предела ограниченной выносливости сварных соединений составляет всего 40 % от аналогичного показателя основного металла (ОМ) (рис. 3). Анализ поверхности усталостного разрушения с применением электронной микроскопии показал, что снижение сопротивления усталости материала произошло за счет образования поверхностных и подповерхностных дефектов при сварке, в том числе неметаллических включений¹.

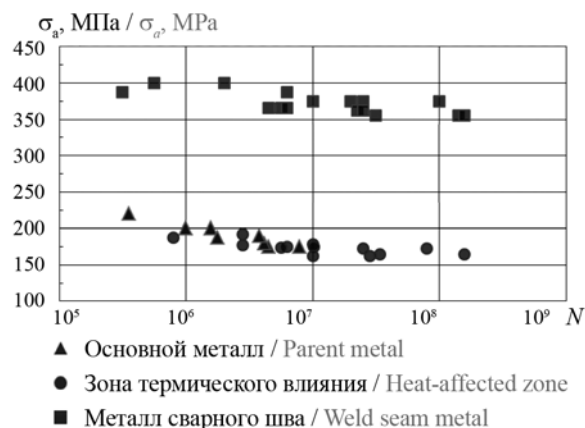


Рис. 3. Усталостные характеристики металла сварных швов из стали Q345 [24]

Fig. 3. Fatigue characteristics of the metal of weld seams, steel Q345 [24]

В публикации [25] приведены исследования усталостной прочности образцов из алюминиевого сплава AA7075–T651, полученных сваркой трением с перемешиванием в условиях усталостного высокочастотного нагружения в области VHCF (Very high cycle fatigue). Механические свойства сплава: предел прочности — 462,3 МПа, предел текучести — 435,7 МПа. Исследование проводилось при помощи испытательной машины Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц при симметричном цикле нагружения (коэффициент асимметрии $R = -1$) до 10^9 циклов нагружения. В результате усталостная прочность материала сварных образцов (welding joint) оказалась на 65 % ниже по сравнению с алюминиевым сплавом AA7075 – T651 (base material) (рис. 4). Наибольшее число разрушений пришлось на зону термомеханического влияния.

В работе [26] анализировали поведение усталостных характеристик сварных соединений низколегированной конструкционной стали Q345 (химический состав, %: С 0,15; Si 0,38; Mn 1,36; Р не более

¹ Ультразвуковая система Shimadzu для усталостных испытаний USF-2000. Ускоренные испытания материалов на усталостную прочность. URL: https://www.shimadzu.eu/sites/default/files/shimadzu_usf-2000_flyer_1.pdf

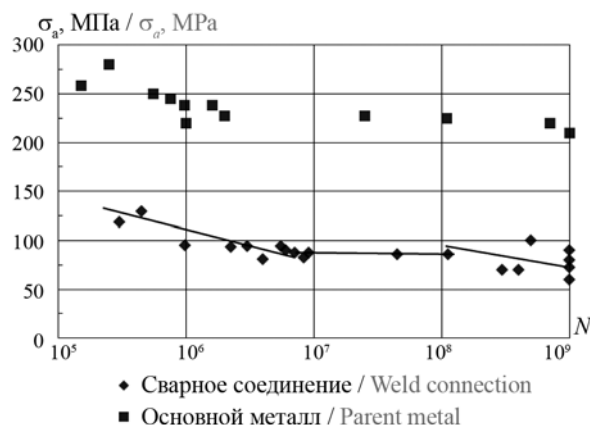


Рис. 4. Усталостные характеристики: алюминиевого сплава — большие квадраты; материала сварных образцов — мелкие ромбы [25]

Fig. 4. Fatigue characteristics: large squares demonstrate the behaviour of aluminum alloy; small rhombuses demonstrate the behaviour of the material of welded samples [25]

0,012; S не более 0,03) в области VHCF. Предел текучести испытываемого материала равен 420 МПа. В результате усталостных испытаний, проведенных на испытательной машине Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц при симметричном цикле нагружения (коэффициент асимметрии $R = -1$), было установлено, что по достижении VHCF усталостная прочность сварного шва и зоны термического влияния снижается на 60 и 55 % соответственно по сравнению с основным материалом. Также установлено, что вероятность зарождения трещин в основном материале и в зоне термического влияния ниже, чем в зоне сварки. Это связано с тем, что усталостная трещина зарождалась непосредственно от дефектов в сварном шве.

Основываясь на проведенном литературном обзоре, можно сделать вывод о том, что наличие сварных соединений оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики конструкции в целом в условиях циклического высокочастотного нагружения. Поведение сварных соединений

(основной металл, зона термического влияния (далее — ЗТВ) и сварной шов) в области VHCF при высокочастотном нагружении отличается от принятых стандартов: сварной шов является самым уязвимым местом: его усталостная долговечность снижается до 60 %, а также служит очагом зарождения микротрещин. Как показал проведенный обзор, исследования, посвященные анализу поведения материала технологического трубопровода, ограничиваются испытаниями лишь ОМ, в то время как усталостные разрушения происходят в сварных швах (концентраторах напряжений), вызванных протеканием термического цикла сварки. Основываясь на вышесказанном, изучение поведения сварных соединений технологических трубопроводов под действием высокочастотных вибраций является актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модельного материала была выбрана сталь 20. Химический состав, %: С 0,17–0,24, Si 0,17–0,37, Mn 0,35–0,65; Cu и Ni не более 0,25, As не более 0,08, S не более 0,4, P 0,035; предел прочности равен 545 МПа, предел текучести — 357 МПа (данные получены посредством проведенных испытаний на растяжение с использованием Shimadzu AG-100kNXplus). Сварные соединения изготавливались в соответствии с ГОСТ 5264-80², сваривались из круглого проката диаметром 12 мм ручной дуговой сваркой. Данный способ сварки — один из наиболее часто применяемых при монтаже технологических трубопроводов, кроме того, сварные швы, полученные ручной дуговой сваркой, относительно других применяемых для этих целей способов, как правило, характеризуются большим количеством дефектов, влияние которых рассматривается в настоящей работе. Согласно ГОСТ¹ в табл. 1 представлены основные характеристики сварного соединения: двустороннее стыковое сварное соединение с двумя симметричными скосами кромок C25.

² ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры : введен 01.07.1981. М. : Стандартинформ, 2010. 33 с.

Табл. 1. Основные характеристики сварного соединения¹

Table 1. Basic characteristics of a weld joint¹

Тип Weld joint type	Форма кромок Edge shape	Характер сварного шва Weld seam type	Форма поперечного сечения / Section profile	
			подготовленных кромок of prepared edges	сварного шва of a weld seam
Стыковое Butt-welded joint	С двумя симметричными скосами кромок Double vee butt groove	Двусторонний Double-sided		

Для проведения высокочастотных циклических испытаний использовались образцы с рабочей частью в виде песочных часов, схематичное изображение которых представлено на рис. 5¹. Для предотвращения образования поверхностных трещин во время испытаний на усталость в области VHCF поверхность образцов должна иметь шероховатость не более 0,6 мкм. Образцы вырезались из сварного соединения модельного материала таким образом, чтобы сварной шов находился в самой узкой части образца и был симметричен от центра.³

Для осуществления выбора значения амплитуды испытания проведен анализ существующих исследований по основному металлу СТ20: максимальное значение амплитуды для испытаний на усталость в работе [26] составляло более 800 МПа, в труде [27] — более 1050 МПа, что значительно превышает предел прочности стали 20 (≈ 540 МПа). Поэтому для изучения влияния усталостного нагружения на структуру и механические характеристики сварных соединений модельного материала начальной амплитудой целесообразно установить значение 650 МПа, близкое к пределу прочности, с последующим постепенным понижением. Справедливость данного выбора подтверждается исследованиями [28–30], утверждающими, что фактические напряжения, возникающие в материале технологического трубопровода в зонах, склонных к зарождению и развитию дефектов структуры металла, соизмеримы с пределом текучести материала либо превышают его.

Испытания на усталость при высокочастотном режиме нагружения проводились в лаборатории механических испытаний и структурного анализа материалов ДВФУ на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000, при симметричном

цикле нагружения (рис. 5). Принцип работы установки заключается в том, что циклические нагрузки создаются не за счет приложения силы к образцу, а за счет резонанса. Пьезоэлемент создает вибрацию с частотой 20 000 Гц, которая передается на испытуемый образец, а свободный конец резонируемого образца перемещается с частотой, задаваемой пьезоэлементом. Выход из резонанса образца означает наличие как внутренних разрушений и микро трещин, так и внешних магистральных трещин.

С целью выявления дефектности сварного шва произведен радиографический контроль сварных соединений образцов для высокочастотных испытаний на усталость. Методика проведения неразрушающего контроля радиографическим методом соответствует ГОСТ 7512-82⁴. К радиографическому методу было подготовлено 15 образцов (образцы № 1, 2 выполнены из ОМ). Полученные результаты, представленные в табл. 2 и на рис. 6, оценивались по трехбалльной системе в соответствии с требованиями, предусмотренными ГОСТ 25.502-79⁵.

После проведения испытаний на усталость образцы подвергались структурному анализу. Подготовка к нему состояла из двух основных операций: вырезка и подготовка поверхности образцов (шлифование и полирование; химическое травление поверхности).

Структурный анализ состоит из двух основных этапов: оптическая металлография и измерение микротвердости поверхности образца. Оптическая металлография заключается в исследовании структуры специально подготовленных образцов (микрошлифов) и проводится с целью определения количества, размеров и типов структурных состав-

⁴ ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод : введен 01.01.1984. М. : Изд-во стандартов, 2008. 18 с.

⁵ ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость : введен 01.01.1981. М. : Стандартинформ, 2005. 25 с.

³ Технические характеристики испытательной машины Shimadzu USF-2000. URL: <https://www.element-msc.ru/katalog/types/oborudovanie-dlya-ispytaniia-mehanicheskikh-svoistv-materialov/sistemy-dlia-provedeniia-dinamicheskikh-ispytanii-shimadzu/ultrazvukovaya-ispytatelnaya-mashina-dlya-ustalostnykh-ispytaniy-usf-2000>

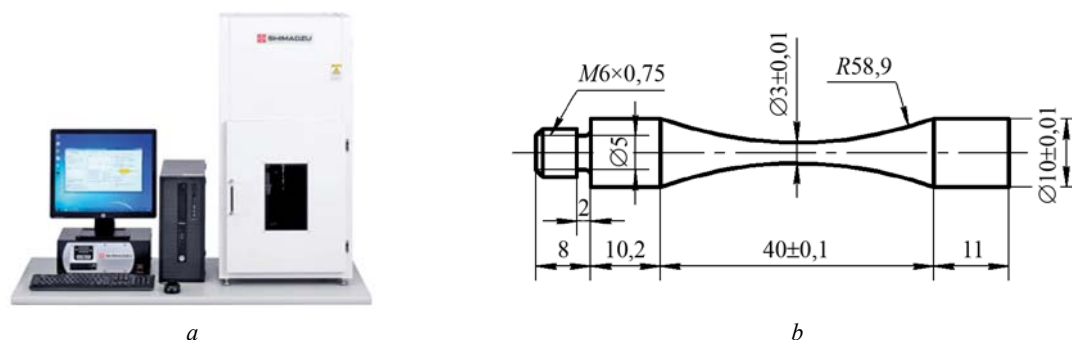
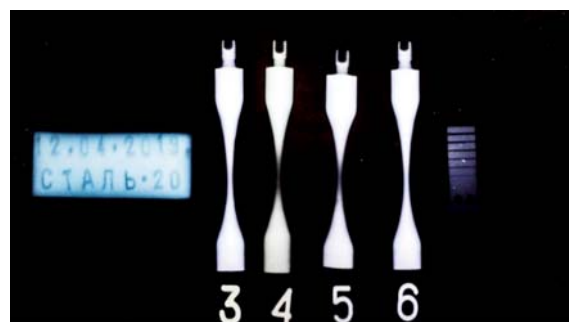


Рис. 5. Ультразвуковая испытательная машина Shimadzu USF-2000 (а)³; образец для высокочастотных испытаний на усталость (b)

Fig. 5. Ultrasonic testing machine Shimadzu USF-2000 (a)³; a specimen for high frequency fatigue testing (b)



a



b

Рис. 6. Результат радиографического контроля (a); образцы, подготовленные для структурного анализа (b)

Fig. 6. Radiographic inspection result (a); samples prepared for the structural analysis (b)

ляющих. Анализ структуры исследуемых образцов осуществляется с помощью металлографического инвертированного микроскопа Eclipse MA200 при увеличениях 100х и 500х.

Методы определения механических свойств сварных соединений, в частности метод измерения твердости металла, регламентируются требованиями ГОСТ 7512-82², ГОСТ 6996-66⁶. Однако данная методика не позволяет оценить твердость структурных составляющих различных участков сварного соединения и наплавленного металла на микроскопическом уровне, вследствие чего не применима при оценке изменения структуры под влиянием высокочастотной вибрации в настоящей работе. Методика измерения микротвердости вдавливанием алмазных наконечников⁷ предназначена для оценки твердости материалов микроскопического объема, в том числе отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, благодаря чему является наиболее подходящим решением при выполнении поставленной задачи. Измерение микротвердости металла образцов из стали 20 производилось методом Виккерса по восстановленному отпечатку (основной метод) с нагрузкой 0,025 Н с выдержкой 10 секунд при помощи автоматического микротвердомера HNV-G-FA-D (Shimadzu, Япония). Нагрузка подбиралась экспериментально исходя из размера сформированной структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном разделе приведены результаты радиографического контроля сварных образцов, испытаний на усталость при высокочастотном режиме нагружения, а также оптическая металлография и микротвердость.

⁶ ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств : введен 01.01.1967. М. : Стандартинформ, 2005. 66 с.

⁷ ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников : введен 01.01.1977. М. : Изд-во стандартов, 1993. 33 с.

Результаты радиографического контроля сварных образцов

По результатам неразрушающего контроля (табл. 2) было выделено три группы образцов: дефектов не обнаружено (ДНО), допустимый дефект (ДД), недопустимый дефект (НДД) и два вида дефектов — пора (П), шлаковое включение (Ш). В работе предлагается проследить влияние того или иного дефекта на усталостные характеристики под действием высокочастотных вибраций, определить амплитуды, при которых возможна безопасная эксплуатация модельного материала, а также разобратся в причинах разрушения.

Табл. 2. Результаты радиографического контроля

Table 2. Radiographic inspection results

Номер образца Sample number	Запись дефектов согласно [6] Defects registered pursuant to [6]
3	ДНО / No defects detected
4	П 0,8 × 0,3 / Pore 0.8 × 0.3
5	Ш 1,5 × 2 / Slag inclusion 1.5 × 2
6	ДНО / No defects detected
7	2П 0,3, П 2 × 0,4 / 2 pores 0.3; pore 2 × 0.4
8	П 0,5 × 0,2 / Pore 0.5 × 0.2
9	П 0,7 × 1 / Pore 0.7 × 1
10	П 2 × 0,9 / Pore 2 × 0.9
11	ДНО / No defects detected
12	С 2, 5П 0,9 Cluster of pores having the size of 2 mm, 5 pores 0.9 mm each
13	ДНО / No defects detected
14	ДНО / No defects detected
15	ДНО / No defects detected
16	2П 0,9 / 2 Pores 0.9
17	Ш 3 × 2,5 / Slag inclusion 3 × 2.5

Результаты высокочастотного нагружения

С целью оценки влияния высокочастотного циклического нагружения на структуру сварных соединений из стали 20 было изготовлено 18 образцов, результаты приведены в табл. 3 и на рис. 7. Образцы 1–3 изготавливались из ОМ СТ20 для сравнительного анализа и для проверки начальной амплитуды испытаний — 650 МПа. Как показали проведенные исследования, выбранная амплитуда

приводит к сильному изменению структуры ОМ под действием высокочастотных вибраций и нецелесообразна для сварного соединения. Образец 3 достиг $1,7212 \cdot 10^8$ циклов при амплитуде испытаний 500 МПа, что стало отправным значением для дальнейшего изучения сварных соединений.

Образцы 4–9 — бездефектные сварные, 8 и 9 имеют предел долговечности по достижению 10^9 циклов 400 МПа, что на 20 % ниже аналогичных

Табл. 3. Общая сводная таблица по проведенным исследованиям

Table 3. Consolidated table of summarized research

Номер Number	Рентгенография Radiographic inspection	σ_a , МПа σ_a , MPa	N	Причина разрушения/остановки Cause of failure/stop
1	—	650	$9,6856 \cdot 10^3$	Образовалась измененная структура Structural change
2	—	550	$9,6751 \cdot 10^3$	Образовалась измененная структура Structural change
3	—	500	$1,7212 \cdot 10^8$	Остановка по достижению заданного числа циклов/без явных структурных изменений A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes
4	ДНО No defects detected	500	$1,8474 \cdot 10^5$	Без явных структурных изменений No evident structural changes
5	Д.Н.О No defects detected	500	$4,2626 \cdot 10^5$	Без явных структурных изменений No evident structural changes
6	ДНО No defects detected	500	$1,2147 \cdot 10^5$	Трещина от поры с сварным шве A crack caused by pores in the weld seam
7	ДНО No defects detected	450	$5,9082 \cdot 10^5$	Без явных структурных изменений No evident structural changes
8	ДНО No defects detected	400	$1,01 \cdot 10^9$	Остановка по достижению заданного числа циклов/без явных структурных изменений A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes
9	ДНО No defects detected	400	$1,3888 \cdot 10^9$	Остановка по достижению заданного числа циклов/без явных структурных изменений A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes
10	П $0,8 \times 0,3$ (ДД) 0.8×0.3 pores (acceptable defect)	400	$1,2295 \cdot 10^7$	Трещины от поры в сварном шве Cracks caused by pores in the weld seam
11	2П $0,3$; П $2 \times 0,4$ (НДД) Two 0.3 pores; 2×0.4 pore (inacceptable defect)	400	$9,6001 \cdot 10^4$	Магистральная трещина в зоне сварного шва A major crack in the weld seam zone
12	П $2 \times 0,9$ (НДД) 2×0.9 pore (inacceptable defect)	400	$1,2407 \cdot 10^5$	Образовалась измененная структура Structural change
13	2П $0,9$ (НДД) Two 0.9 pores (inacceptable defect)	400	$4,4481 \cdot 10^5$	Трещины от поры в сварном шве и ЗТВ Cracks caused by pores in the weld seam and the heat- affected zone
14	Ш $1,5 \times 2$ (НДД) 1.5×2 slag inclusion (inacceptable defect)	300	$2,0811 \cdot 10^6$	Образовалась трещина от включения A crack caused by an inclusion

Номер Number	Рентгенография Radiographic inspection	σ_a , МПа σ_a , MPa	N	Причина разрушения/остановки Cause of failure/stop
15	П 0,7 × 1 (ДД) 0.7 × 1 pore (acceptable defect)	300	$5,4489 \cdot 10^8$	Остановка по достижению заданного числа циклов/без явных структурных изменений A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes
16	С2,5 П 0,9 (НДД) Cluster of pores 2.5; 0.9 pore (inacceptable defect)	300	$2,5064 \cdot 10^9$	Остановка по достижению заданного числа циклов/ линейная пористость сварного шва A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes
17	Ш 3 × 2,5 (НДД) 3 × 2.5 slag inclusion (inacceptable defect)	266	$9,8875 \cdot 10^5$	Трещина большого размера (1500 мкм) A large crack (1,500 μm)
18	П 0,5 × 0,2 (ДД) 0.5 × 0.2 0 pore (acceptable defect)	252	$1,3465 \cdot 10^8$	Остановка по достижению заданного числа циклов/без явных структурных изменений A stop due to the completion of the pre-set number of cycles/ No evident structural changes

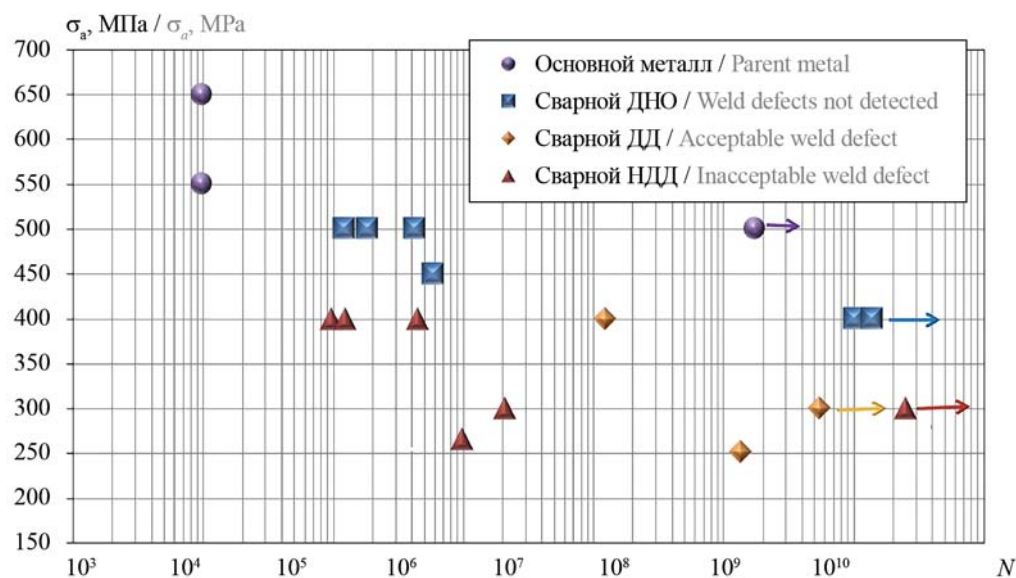


Рис. 7. Результаты высокочастотных испытаний на усталость стали 20

Fig. 7. High frequency fatigue testing results (steel 20)

характеристик ОМ, образцы 10–18 с допустимыми и недопустимыми дефектами не имеют строгой зависимости от влияния размера и классификации дефекта на предел долговечности, в обоих случаях наличие дефекта большого размера оказывает большее влияние на исследуемые характеристики.

Результаты структурного анализа

Образцы 1, 2 изготовлены из ОМ без сварного соединения для сравнительного анализа усталостного высокочастотного разрушения. На рис. 8 показана структура образца 2 (образец 1 имеет идентичную картину разрушения): в центральной, наиболее нагруженной части наблюдаются сильные изменения в структуре, характерный размер зерен уменьшается

с 18 мкм (типичного для стали 20 — рис. 7, а) до 11–12 мкм (рис. 8, b, c), на поверхности зерен феррита после травления появляется рельеф, обусловленный выстраиванием дислокационных стенок.

Результаты измерения микротвердости образцов 1 и 2 из ОМ стали 20 отражены на рис. 9.

Значения микротвердости образцов 1 и 2 (рис. 9) ОМ СТ20 соответствуют 147 HV для феррита и 196 HV для перлита. Согласно графику, средние значения микротвердости феррита и перлита в центральной части образцов с измененной структурой в среднем 258 HV для феррита и 400 HV для перлита, что на 75 и на 100 % соответственно превышает значения данных структурных составляющих ОМ. Значительное

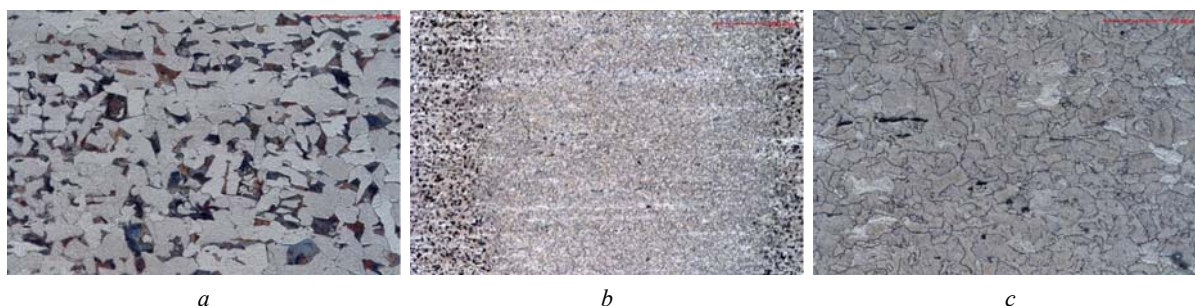


Рис. 8. Образец 2: *a* — увеличение 100х; *b, c* — увеличение 500х

Fig. 8. Sample 2: *a* — 100x magnification; *b, c* — 500x magnification

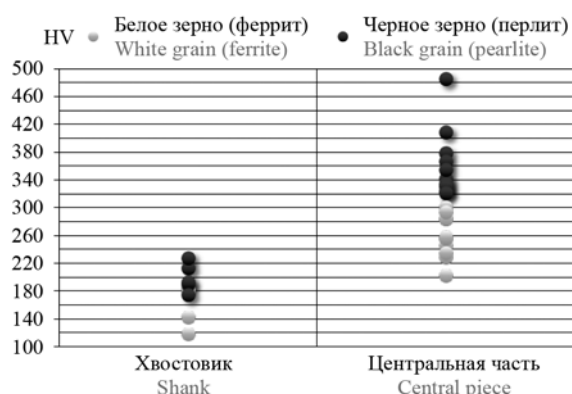


Рис. 9. Результаты измерения микротвердости образцов 1 и 2 (хвостовик — основной металл, центральная часть — сварной шов)

Fig. 9. Samples 1 and 2: microhardness measurement results (the shank is the parent metal; the central piece is the weld seam)

повышение микротвердости наиболее нагруженной части образца может являться следствием структурных изменений, выявленных после высокочастотных испытаний на усталость.

Образцы сварные, без дефектов в сварном шве. В соответствии с табл. 2 в данной работе исследовалось 6 образцов без дефектов в сварном шве, одна-

ко, как показывают металлографические исследования, линейная пористость шва присутствует, однако ее размеры малы и не распознаются при проведении радиографического контроля.

Образец 6. Структура образца 6 представлена на рис. 10. Радиографический контроль данного образца не обнаружил дефектов сварного шва. Основной металл имеет типичную для стали 20 структуру, не имеющую выраженных усталостных изменений. Средний размер зерен составляет 18 мкм. Структура металла зоны термического влияния близка к исходной, но имеет некоторые отличия — в частности, размер зерен в среднем составляет 14–15 мкм. На рис. 10 хорошо различима граница ЗТВ и сварного шва, были обнаружены отдельные поры, размер которых составляет единицы мкм. Средний размер зерен — 7–8 мкм. Видимых усталостных изменений нет. Схожая картина отмечена в образце 13: радиографическим методом дефектов не обнаружено, средний размер зерен — 18 мкм, в ЗТВ — 13–14 мкм, в зоне сварного шва — 6–7 мкм.

Результаты измерения микротвердости различных участков образцов 6 и 13 представлены на рис. 11. Средние значения микротвердости: феррита ОМ лежат в диапазоне 141–152 HV, ЗТВ — 147–153 HV, сварного шва — 165–190 HV; перлита ОМ — 165–185 HV. Заметно увеличение микро-

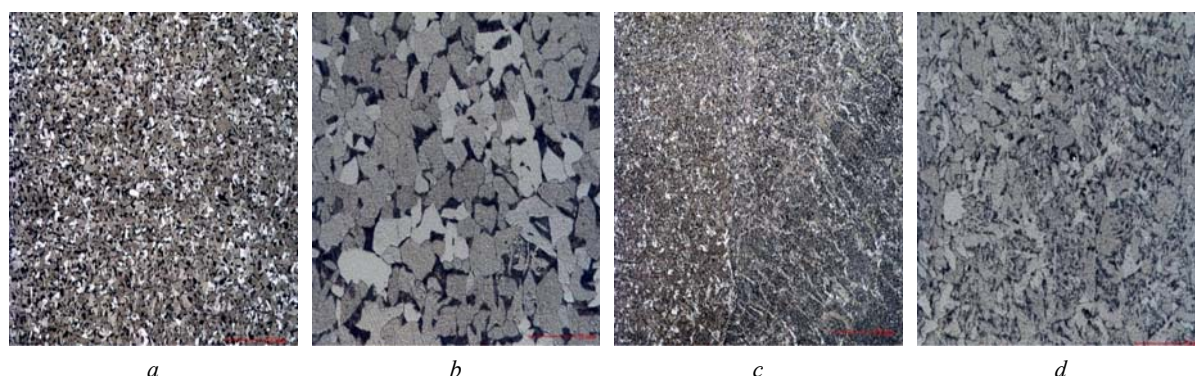


Рис. 10. Образец 6: основной металл: *a* — увеличение 100х; *b* — увеличение 500х; зона сварного шва: *c* — увеличение 100х; *d* — увеличение 500х

Fig. 10. Sample 6. Parent metal: *a* — 100x magnification; *b* — 500x magnification; weld seam zone: *c* — 100x magnification; *d* — 500x magnification

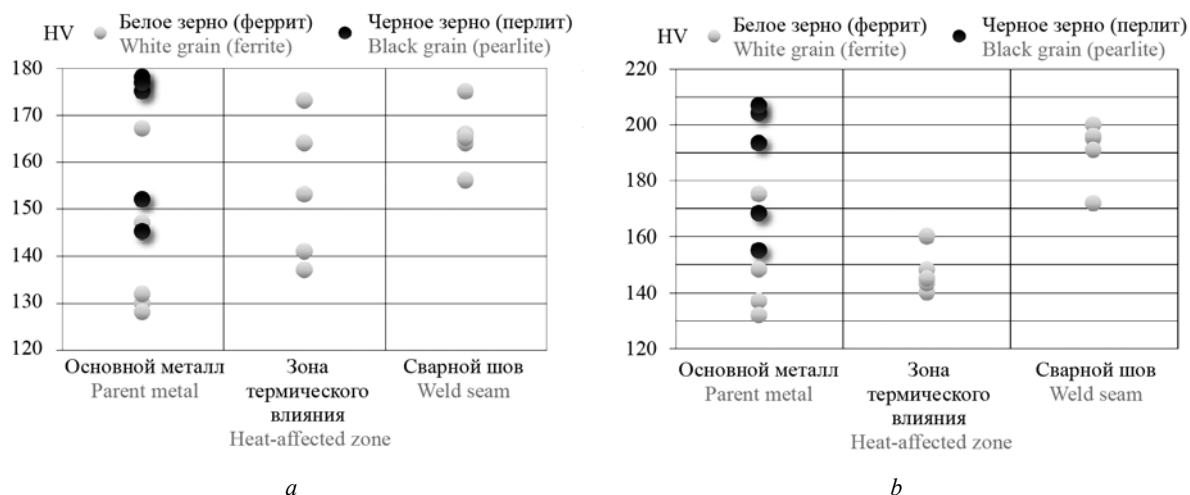


Рис. 11. Результаты измерения микротвердости: *a* — образец 6; *b* — образец 13

Fig. 11. Microhardness measurement results: *a* — sample 6; *b* — sample 13



Рис. 12. Образец 14, зона сварного шва: *a* — увеличение 50х; *b* — увеличение 500х

Fig. 12. Sample 14, weld seam zone: *a* — 50x magnification; *b* — 500x magnification

твердости феррита сварного шва на 22 % по сравнению с ОМ. Содержание перлита в наплавленном металле мало, и измерить его микротвердость затруднительно.

Образец 14. На рис. 12 представлена структура центральной части сварного бездефектного образца 14. Основную часть снимка занимает сварной шов, в левой части виден участок ЗТВ. Различается ориентация кристаллитов по градиенту температуры в процессе сварки. Заметная пористость по всему объему шва (размером до 40 мкм), на границе зоны сплавления наблюдается линейная пористость. Средний размер зерен составляет 8 мкм. На границе шва и ЗТВ (прямо на продолжении линейной пористости) видна трещина, идущая от поверхности на глубину около 300 мкм.

Образцы сварные бездефектные при амплитудах 500 МПа выходили из резонанса с образованием трещин в ЗТВ. Заданное количество циклов получили при амплитудах 400 МПа.

Образцы сварные с допустимыми дефектами в сварном шве. В соответствии с табл. 2 в данной работе исследовалось 3 образца с допустимыми

дефектами в сварном шве с амплитудами 400, 300 и 252 МПа.

Образец 4. На рис. 13 представлена структура зоны термического влияния и зоны сварного шва 4 образца. В данном образце (рис. 14, *a*) была обнаружена сварочная пора диаметром около 900 мкм и идущая от нее тонкая трещина, проходящая по наплавленному металлу (близко к границе с ЗТВ). Таким образом видимых деформационных изменений структуры образца 4 не обнаружено. Разрушение произошло по шву от дефекта, образовавшегося при сварке.

Образцы 8, 9. В исследуемых образцах микроструктура стандартна для сварного соединения, без каких-либо видимых структурных изменений и(или) пластической деформации.

Результаты измерения микротвердости различных участков образцов 8 и 9 приведены на рис. 15. Средние значения микротвердости: феррита ОМ лежат в диапазоне 173–191 HV, ЗТВ — 164–203 HV, сварного шва — 193–256 HV; перлита ОМ — 188–216 HV, ЗТВ — 196–223 HV, сварного шва — 212 HV. Заметно увеличение микротвердости феррита сварного шва на 23 % по сравнению с ОМ.

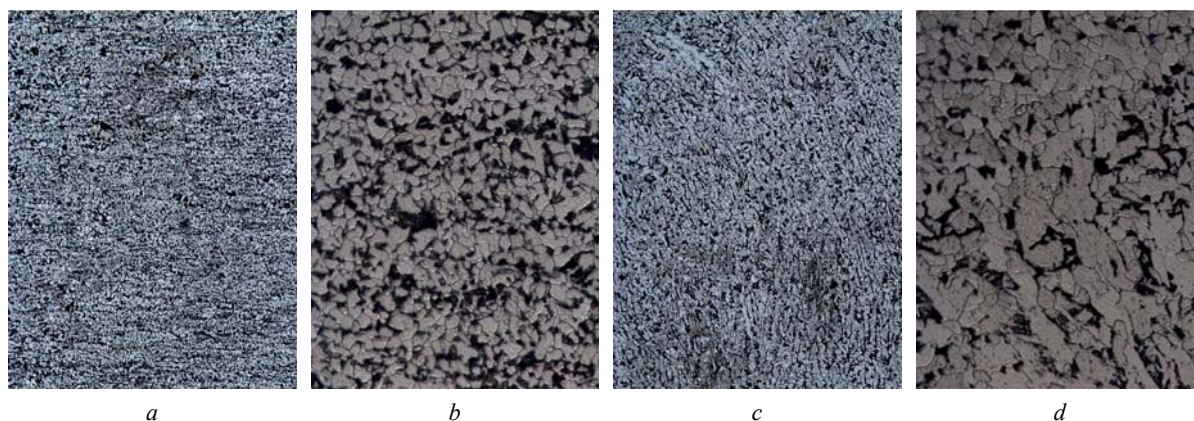


Рис. 13. Образец 4, зона термического влияния: *a* — увеличение 100х; *b* — увеличение 500х; зона сварного шва: *c* — увеличение 100х; *d* — увеличение 500х

Fig. 13. Sample 4, heat-affected zone: *a* — 100x magnification; *b* — 500x magnification; weld seam zone: *c* — 100x magnification; *d* — 500x magnification

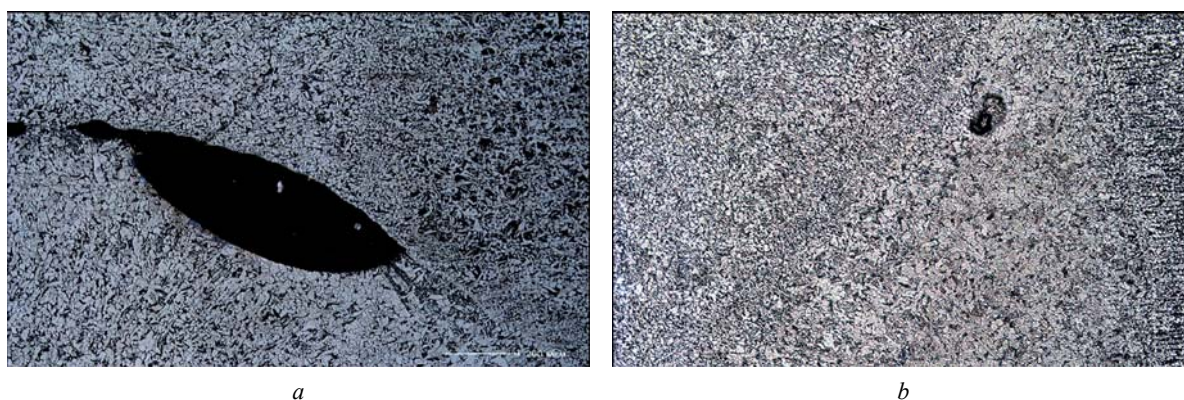


Рис. 14. Образцы 4 (*a*); 8 (*b*) зона поры, увеличение 100х

Fig. 14. Samples 4 (*a*); 8 (*b*): pore zone, 100x magnification

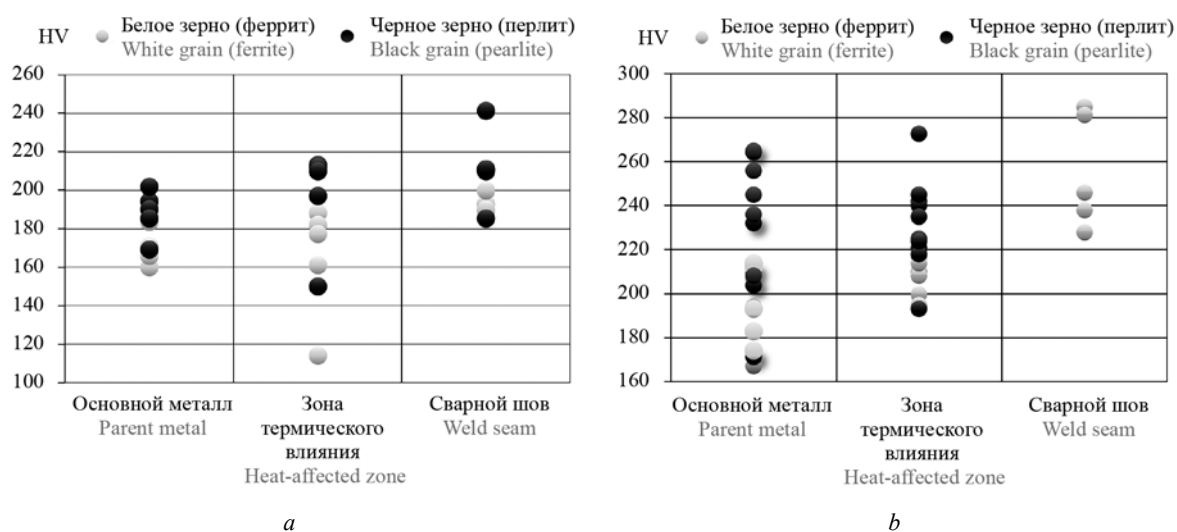


Рис. 15. Результаты измерения микротвердости: *a* — образец 8; *b* — образец 9

Fig. 15. Microhardness measurement results: *a* — sample 8; *b* — sample 9

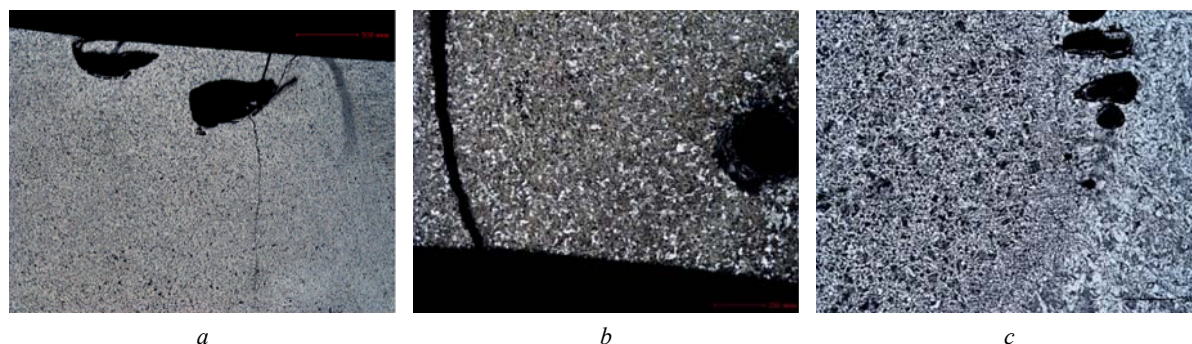


Рис. 16. Увеличение 100х: *a* — образец 5, зона сварного шва; *b* — образец 7, зона сварного шва; *c* — образец 12, зона сварного шва

Fig. 16. 100x magnification: *a* — sample 5, weld seam zone; *b* — sample 7, weld seam zone; *c* — sample 12, weld seam zone

На рис. 14, *b* представлен образец 8. Данный образец — сварной с допустимым дефектом, на границе зоны сплавления видна пора диаметром около 80 мкм. Так как образец был остановлен по достижению заданного числа циклов и не выявлено явных структурных изменений, дополнительно провели измерение микротвердости вокруг поры: среднее значение феррита 247 HV, что лежит в диапазоне измерений феррита сварного шва образца в целом, т.е. преднапряженного состояния около поры относительно сварного шва нет. Содержание перлита в наплавленном металле мало, и измерить его микротвердость затруднительно.

Образцы сварные с недопустимыми дефектами в сварном шве. Как показали проведенные исследования, основной причиной разрушения являются микротрещины, образовавшиеся от недопустимого дефекта сварного шва (рис. 16).

Измерение микротвердости образца 17 производилось в ОМ на концах образца, зоне термического влияния и сварном шве (рис. 17).

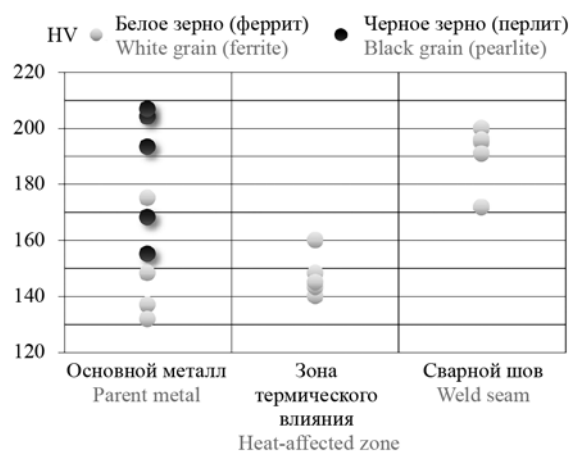


Рис. 17. Результаты измерения микротвердости образца 17

Fig. 17. Microhardness measurement results, sample 17

Результаты измерения микротвердости различных участков образца 17 представлены на рис. 17. Средние значения микротвердости: феррита — 180 HV, ЗТВ — 197 HV, сварного шва — 240 HV; перлита ОМ — 204 HV, ЗТВ — 202 HV, сварного шва — 261 HV. Заметно увеличение микротвердости феррита сварного шва на 33 и перлита на 30 % по сравнению с ОМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: в ходе высокочастотных испытаний на усталость из 15 сварных образцов 6 подверглись разрушению вследствие образования микротрещин (1 — без выявленных дефектов и 5 — с дефектами сварного шва); 4 образца вышли из резонанса из-за нарушения целостности структуры, и 5 образцов остановлено по достижению заданного числа циклов нагружения.

Установлено, что усталостные изменения в стали 20 при высокочастотном нагружении могут приводить к измельчению зерна; высокочастотные усталостные изменения в стали 20 приводят к повышению микротвердости образца, особенно вблизи микротрещин и дефектов сварного шва. Таким образом, измерение микротвердости может применяться параллельно с металлографией для более надежного обнаружения изменений.

По результатам испытаний и последующего структурного анализа сварных образцов из стали 20 можно оценить влияние высокочастотного циклического нагружения на структуру и свойства сварных соединений из стали 20:

- значение предела выносливости сварных образцов без выявленных дефектов сварного шва на $\approx 20\%$ ниже по сравнению с показателем ОМ, что подтверждает негативный характер влияния термического цикла сварки, а также обуславливает необходимость проведения данных исследований для получения реальных усталостных характеристик под действием высокочастотного нагружения;

- усталостные изменения в стали 20 при высокочастотных нагрузках могут приводить к измельчению зерна;
- дефекты сварного шва оказывают значительное влияние на усталостные характеристики материала в условиях высокочастотного нагружения: предел выносливости образцов с дефектами сварного шва при 10^9 циклов принимает значение 300 МПа, что на 42 % ниже аналогичного показателя сварных образцов без выявленных дефектов и на 67 % ниже по сравнению с ОМ;
- на основании того, что экспериментальные значения предела выносливости образцов с допустимыми и недопустимыми дефектами лежат в одном числовом диапазоне, можно предположить, что значительное влияние на усталостные характеристики оказывают не размер и типология дефекта, а его наличие;
- под действием высокочастотного нагружения амплитудой 550–650 МПа в ОМ стали 20 может образовываться сильно измененная структура: выявлено повышение микротвердости на величину порядка 50–60 % для феррита и 70–80 % для перлита;
- согласно полученным данным, критическая амплитуда для сварных образцов без выявленных дефектов сварного шва принимает значение 500 МПа, разрушение образцов с допустимыми и недопустимыми дефектами сварного шва происходит при амплитуде 400 МПа;
- анализ существующих исследований по данной тематике показал, что действующие напряжения в технологических трубопроводах, обвязывающих насосно-компрессорное оборудование, лежат в диапазоне 360–400 МПа. Однако по результатам проведенных испытаний амплитуда испытания 400 МПа не является безопасной для образцов, содержащих допустимые дефекты сварного шва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщая полученные результаты по представленной работе, можно утверждать, что высокочастотные вибрации оказывают негативное влияние как на ОМ технологического трубопровода, так и на сварные соединения из него. Место разрушения — сварной шов, активаторы процесса разрушения — наличие дефектов, причем влияние на усталостные характеристики оказывают не размер и типология дефекта, а его наличие. Характеристики долговечности при высоких частотах нагружения сварного соединения в гигацикловой области на 67 % ниже по сравнению с ОМ. При амплитудах 550–560 МПа в ОМ стали 20 может образовываться сильно измененная структура: установлено повышение микротвердости на величину порядка 50–60 % для феррита и 70–80 % для перлита. Известно, что реальные действующие амплитуды в технологических трубопроводах превышают предел текучести основного материала. Как показало проведенное исследование, критическая амплитуда для сварных образцов без выявленных дефектов сварного шва принимает значение 500 МПа, разрушение образцов с допустимыми и недопустимыми дефектами сварного шва происходит при амплитуде 400 МПа, т.е. амплитуда испытания 400 МПа не является безопасной для сварных соединений, содержащих допустимые дефекты.

Результаты описанного в данной работе исследования показывают зависимости параметров состояния технологического трубопровода от факторов высокочастотного динамического воздействия, изменяющихся условий использования и позволяют решать задачу оптимальной эксплуатации трубопроводной системы с учетом повышения пропускной способности, продления ЖЦ отдельных узлов и элементов, а также всей конструкции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жариков В.В., Крисанов А.Е., Меринов С.В., Шумкин А.А. Экспертно-диагностическое обследование и продление срока службы технологических трубопроводов компрессорной станции // Международный научный институт «Educatio». 2015. № 11 (18). С. 40–43.
2. Chapetti M., Jaureguizar L. Estimating the fatigue behaviour of welded joints // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. Pp. 959–964. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.158
3. Коргин А.В., Одесский П.Д., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З., Романец В.А., Королева Е.А. Прочность алюминиевых сплавов для мостостроения // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 8. С. 10–19. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-8-10-19
4. Баширов И.В. Оценка ресурса элементов трубопроводной обвязки насосно-компрессорных агрегатов с учетом вибрационного воздействия. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2012. 24 с.
5. Заец А.Ф. Разработка методов оценки работоспособности трубопроводов компрессорных станций при наличии дефектов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : Всероссийский НИИ природных газов, 1998. 18 с.
6. Wang Q., Berard J., Dubarre A., Baudry G., Rathery S., Bathias C. Gigacycle fatigue of ferrous alloys // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999. Vol. 22. Issue 8. Pp. 667–672. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00185.x
7. Хуснутдинова И.Г., Баширов М.Г. Оценка технического состояния и ресурса безопасной

эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта // Нефтегазовое дело. 2019. № 1. С. 144–162. DOI: 10.17122/ogbus-2019-1-144-162

8. *Chai G.* The formation of subsurface non-defect fatigue crack origins // *International Journal of Fatigue*. 2006. Vol. 28. Issue 11. Pp. 1533–1539. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.060

9. *He C., Liu Y.J., Wang Q.Y.* Very high cycle fatigue properties of welded joints under high frequency loading // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 647. Pp. 817–821. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.647.817

10. *D'Ambros H.C.M., Silva T.D.D.A., Mesquita E.F.T., Barros R.F.* Damages in weld joint of water elevated reservoir steel structures // *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 11. Pp. 114–121. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.016

11. *Bayraktar E., Garcias I., Bathias C.* Failure mechanisms of automotive metallic alloys in very high cycle fatigue range // *International Journal of Fatigue*. 2006. Vol. 28. Issue 11. Pp. 1590–1602. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.019

12. *Lawrence F.V., Ho N.J., Mazumdar P.K.* Predicting the fatigue resistance of welds // *Annual Review of Materials Science*. 1981. Vol. 11. Issue 1. Pp. 401–425. DOI: 10.1146/annurev.ms.11.080181.002153

13. *Miao J., Pollock T.M., Jones J.W.* Crystallographic fatigue crack initiation in nickel-based superalloy René 88DT at elevated temperature // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. Issue 20. Pp. 5964–5974. DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2009.08.022

14. *Mikulski Z., Lassen T.* Fatigue crack initiation and subsequent crack growth in fillet welded steel joints // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 120. Pp. 303–318. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.11.014

15. *Miller K.J., O'Donnell W.J.* The fatigue limit and its elimination // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999. Vol. 22. Issue 7. Pp. 545–557. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00204.x

16. *Zhu M.-L., Xuan F.-Z., Du Y.-N., Tu S.-T.* Very high cycle fatigue behavior of a low strength welded joint at moderate temperature // *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 40. Pp. 74–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.014

17. *Murakami Y., Yokoyama N.N., Nagata J.* Mechanism of fatigue failure in ultralong life regime // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2002. Vol. 25. Issue 8–9. Pp. 735–746. DOI: 10.1046/j.1460-2695.2002.00576.x

18. *Nie Y., Fu W., Hui W.J., Dong H., Weng Y.Q.* Very high cycle fatigue behaviour of 2000-MPa ultra-high-strength spring steel with bainite-martensite duplex microstructure // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009. Vol. 32. Issue 3. Pp. 189–196. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01319.x

19. *Teng T.L., Fung C.P., Chang P.H.* Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints // *International Journal of Pressure Ves-*

sels and Piping. 2002. Vol. 79. Issue 7. Pp. 467–482. DOI: 10.1016/s0308-0161(02)00060-1

20. *Tridello A., Paolino D., Chianuss G., Rossetto M.* VHCF strength decrement in large H13 steel specimens subjected to ESR process // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. Pp. 1117–1124. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.143

21. *Zachwieja J.* Stress analysis of vibrating pipelines // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 17. Pp. 1–11. DOI: 10.1063/1.4977691

22. *Guo S., Wang R., Chen H., Xuan F.* A comparative study on the cyclic plasticity and fatigue failure behavior of different subzones in CrNiMoV steel welded joint // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 150. Pp. 66–78. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.026

23. *He C., Liu Y., Dong J., Wang Q., Wagner D., Bathias C.* Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 81. Pp. 171–178. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.012

24. *He C., Huang C., Liu Y., Wang Q.* Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 61. Pp. 297–303. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.018

25. *He C., Liu Y., Fang D., Wang Q.* Very high cycle fatigue behavior of bridge steel welded joint // *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012. Vol. 2. Issue 3. P. 031010. DOI: <https://doi.org/10.1063/2.1203110>

26. *He C., Huang C., Liu Y., Wang Q.* Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 61. Pp. 297–303. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.018

27. *Панкратьев С.А.* Оценка ресурса прочности трубопроводных систем, подверженных вынужденным колебаниям на резонансной частоте : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2009. 23 с.

28. *Садртдинов Р.А.* Влияние длительной эксплуатации на напряженное состояние технологических трубопроводов обвязок компрессорных станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : Изд-во ИФМ УрО РАН, 2008. С. 24.

29. *He C., Liu Y., Tian R., Wang Q.* Gigacycle fatigue behaviors in fusion zone and heat affected zone of Q345 LA steel welded joints // 13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China. 2013. Pp. 2658–2667.

30. *Zhu X., Shyam A., Jones J., Mayer H., Lasecki J., Allison J.* Effect of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles // *International Journal of Fatigue*. 2006. Vol. 28. Pp. 1566–1571. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.04.016

Поступила в редакцию 29 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 25 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Екатерина Александровна Гридасова** — кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства инженерной школы; **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; РИНЦ ID: 589057; olvin@list.ru;

Мария Андреевна Серeda — магистр кафедры сварочного производства инженерной школы; **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; sereda-maha@mail.ru;

Шохрух Шурхатджон Закиров угли — магистр кафедры сварочного производства инженерной школы; **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; shokhrukhzakirov@gmail.com.

REFERENCES

1. Zharikov V.V., Krisanov A.E., Merinov S.V., Shumkin A.A. Expert-diagnostic examination and extension of the service life of technological pipelines of the compressor station. *International Scientific Institute "Educatio"*. 2015; 11(18):40-43. (rus.).
2. Chapetti M., Jaureguizar L. Estimating the fatigue behavior of welded joints. *Procedia Engineering*. 2011; 10:959-964. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.158
3. Korgin A.V., Odesskiy P.D., Ermakov V.A., Zeid L.Z., Romanets V.A., Koroleva E.A. Strength of aluminum alloys for bridge building. *Deformation and destruction of materials*. 2019; 8:10-19. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-8-10-19 (rus.).
4. Bashirov I.V. *Evaluation of the resource of piping elements of pump and compressor units taking into account the vibration effect*. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University, 2012; 24. (rus.).
5. Zaets A.F. *Development of methods for assessing the performance of pipelines of compressor stations in the presence of defects : abstract dis. Cand. tech. sciences*. Moscow, All-Russian Research Institute of Natural Gases, 1998;18. (rus.).
6. Wang Q., Berard J., Dubarre A., Baudry G., Rathery S., Bathias C. Gigacycle fatigue of ferrous alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999; 22:667-672. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00185.x
7. Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G. Estimation of technical condition and resource of technological pipelines safe operation based on electromagnetic-acoustic effect. *Oil and Gas Business*. 2019; 1:144-162. DOI: 10.17122/ogbus-2019-1-144-162 (rus.).
8. Chai G. The formation of subsurface non-defect fatigue crack origins. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28(11):1533-1539. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.060
9. He C., Liu Y.J., Wang Q.Y. Very high cycle fatigue properties of welded joints under high frequency loading. *Advanced Materials Research*. 2013; 647:817-821. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.647.817
10. D'Ambros H.C.M., Silva T.D.D.A., Mesquita E.F.T., Barros R.F. Damages in weld joint of water elevated reservoir steel structures. *Procedia Structural Integrity*. 2018; 11:114-121. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.016
11. Bayraktar E., Garcias I., Bathias C. Failure mechanisms of automotive metallic alloys in very high cycle fatigue range. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28(11):1590-1602. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.019
12. Lawrence F.V., Ho N.J., Mazumdar P.K. Predicting the fatigue resistance of welds. *Annual Review of Materials Science*. 1981; 11(1):401-425. DOI: 10.1146/annurev.ms.11.080181.002153
13. Miao J., Pollock T.M., Jones J.W. Crystallographic fatigue crack initiation in nickel-based superalloy René 88DT at elevated temperature. *Acta Materialia*. 2009; 57(20):5964-5974. DOI: 10.1016/J.ACTA-MAT.2009.08.022
14. Mikulski Z., Lassen T. Fatigue crack initiation and subsequent crack growth in fillet welded steel joints. *International Journal of Fatigue*. 2019; 120:303-318. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.11.014
15. Miller K.J., O'Donnell W.J. The fatigue limit and its elimination. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999; 22(7):545-557. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00204.x
16. Zhu M.-L., Xuan F.-Z., Du Y.-N., Tu S.-T. Very high cycle fatigue behavior of a low strength welded joint at moderate temperature. *International Journal of Fatigue*. 2012; 40:74-83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.014
17. Murakami Y., Yokoyama N.N., Nagata J. Mechanism of fatigue failure in ultralong life regime. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2002; 25(8-9):735-746. DOI: 10.1046/j.1460-2695.2002.00576.x
18. Nie Y., Fu W., Hui W.J., Dong H., Weng Y.Q. Very high cycle fatigue behaviour of 2000-MPa ultra-high-strength spring steel with bainite-martensite duplex microstructure. *Fatigue & Fracture of Engi-*

neering Materials & Structures. 2009; 32(3):189-196. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01319.x

19. Teng T.L., Fung C.P., Chang P.H. Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2002; 79(7):467-482. DOI: 10.1016/s0308-0161(02)00060-1

20. Tridello A., Paolino D., Chiandussi G, Rossetto M. VHCF strength decrement in large H13 steel specimens subjected to ESR process. *Procedia Structural Integrity*. 2016; 2:1117-1124. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.143

21. Zachwieja J. Stress analysis of vibrating pipelines. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 17:1-11. DOI: 10.1063/1.4977691

22. Guo S., Wang R., Chen H., Xuan F. A comparative study on the cyclic plasticity and fatigue failure behavior of different subzones in CrNiMoV steel welded joint. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019; 150:66-78. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.026

23. He C., Liu Y., Dong J., Wang Q., Wagner D., Bathias C. Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2015; 81:171-178. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.012

24. He C., Huang C., Liu Y., Wang Q. Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2014; 61:297-303. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.018

25. He C., Liu Y., Fang D., Wang Q. Very high cycle fatigue behavior of bridge steel welded joint. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012; 2(3):031010. DOI: 10.1063/2.1203110

26. He C., Huang C., Liu Y., Wang Q. Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2014; 61:297-303. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.018

27. Pankratyev S.A. *Assessment of the durability resource of pipeline systems subject to forced vibrations at the resonant frequency : abstract dis. cand. tech. sciences*. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University, 2009; 23. (rus.).

28. Sadrtidinov R.A. *Influence of long-term operation on the stress state of technological pipelines of compressor station piping : abstract dis. cand. tech. sciences*. Ekaterinburg, Publishing house of the IPM UB RAS, 2008; 24. (rus.).

29. He C., Liu Y., Tian R., Wang Q. Gigacycle fatigue behaviors in fusion zone and heat affected zone of Q345 LA steel welded joints. *13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China*. 2013; 2658-2667.

30. Zhu X., Shyam A., Jones J., Mayer H., Lasecki J., Allison J. Effect of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum in very long life cycles. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28:1566-1571. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.04.016

Received November 29, 2020.

Adopted in revised form on December 25, 2020.

Approved for publication on December 28, 2020.

B I O N O T E S: **Ekaterina A. Gridasova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Welding Production Department of the School of Engineering; **Far Eastern Federal University (FEFU)**; 8 Sukhanova st., Vladivostok, 690091, Russian Federation; ID RISC: 589057; olvin@list.ru;

Maria A. Sereda — master of the Welding Production Department of the School of Engineering; **Far Eastern Federal University (FEFU)**; 8 Sukhanova st., Vladivostok, 690091, Russian Federation; sereda-maha@mail.ru;

Shokhrukh S. Zakirov ugli — master of the Welding Production Department of the School of Engineering; **Far Eastern Federal University (FEFU)**; 8 Sukhanova st., Vladivostok, 690091, Russian Federation; shokhrukhzakirov@gmail.com.

Метод ветвей и границ при организации квартальной застройки

В.З. Величкин, М.В. Петроченко, К.И. Стрелец,
Е.Б. Заводнова, А.Ю. Городишенина

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании организации работ по строительству группы сооружений на этапе застройки квартала гражданскими или промышленными объектами возникает задача обеспечения непрерывной работы выделенных специализированных строительных подразделений при одновременном соблюдении технологии и нормативных сроков возведения отдельных сооружений. Актуальность обусловлена сложностью согласования работы подрядных и субподрядных организаций при строительстве сооружений целого квартала под эгидой генподрядчика. Цель исследования — анализ и применение метода ветвей и границ при решении задач, связанных с организацией квартальной застройки с применением специальных методов теории расписаний.

Материалы и методы. Рассматривается задача обеспечения непрерывной работы выделенных специализированных строительных подразделений при одновременном соблюдении технологии и нормативных сроков возведения отдельных сооружений при организации квартальной застройки.

Результаты. Предложено решение задачи с помощью метода ветвей и границ. В качестве примера приведено строительство восьми сооружений в составе квартальной застройки. Для этих сооружений получены матрицы, отражающие поточную организацию работ при разных методах организации, рассчитаны основные параметры комплексных потоков по строительству сооружений квартала на основе начальных и конечных временных показателей по каждому специализированному потоку на каждом отдельном сооружении, объединены все восемь сооружений с помощью матрицы, отражающей смещение. Рассмотрены два основных способа реорганизации комплексного квартального потока.

Выводы. Выполнено сравнение исходной и оптимизированной матрицы по методу ветвей и границ, приведены вычислительные результаты. Показаны достоинства и недостатки метода критического пути и метода непрерывного использования ресурсов на основе приведенного примера строительства восьми сооружений в составе квартальной застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поточная организация работ, продолжительность строительства, календарное планирование, квартальная застройка, расписание проекта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Величкин В.З., Петроченко М.В., Стрелец К.И., Заводнова Е.Б., Городишенина А.Ю. Метод ветвей и границ при организации квартальной застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С. 91–104. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.91-104

The branch and bound method applied to the construction of residential quarters

Victor Z. Velichkin, Marina V. Petrochenko, Ksenia I. Strelets,
Evgeniya B. Zavodnova, Anna Yu. Gorodishenina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When construction works are scheduled within the framework of a project that encompasses the construction of civil or industrial facilities representing a residential quarter, the focus is placed on the continuous operation of particular specialized construction departments, subject to the adherence to applicable technologies and compliance with standard deadlines that apply to the construction of buildings. The relevance of this problem stems from the complexity of coordination of works to be performed by contractors and subcontractors, involved in the development of a quarter and responsible to the general contractor. The purpose of this research is to analyze and apply the branch and bound method to the problems arising in the course of scheduling the construction of a quarter using special methods of the scheduling theory.

Materials and methods. The article addresses the problem of continuous operation of special-focus construction departments subject to the adherence to applicable technologies and compliance with standard deadlines set for the construction of individual structures when scheduling the construction of residential quarters.

Results. The solution, based on the branch and bound method, is proposed. The construction of eight buildings, that comprise a residential quarter, is taken as an example. Matrices, representing continuous workflows for different methods of work organization, were obtained; principal parameters of integrated workflows, encompassing the construction of the quarter structures, were calculated with regard for the commencement and completion time for each specialized workflow at each individual structure. A displacement matrix was used to consolidate all eight structures. Two principal methods of reorganizing the integrated quarterly workflow are considered.

Conclusions. The branch and bound method is used to compare original and optimized matrices; calculation results are presented. The strengths and weaknesses of the critical path/continuous resource employment method are illustrated by the project that encompasses the construction of eight facilities in a residential quarter.

KEYWORDS: workflow, construction term, scheduling, residential quarter, project work sequence

FOR CITATION: Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Strelets K.I., Zavodnova E.B., Gorodishenina A.Yu. The branch and bound method applied to the construction of residential quarters. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):91-104. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.91-104 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Началу строительства любого объекта предшествует специальная подготовка, призванная создать условия для успешной реализации строительного проекта. Важным элементом подготовки строительного производства является разработка календарного плана строительства, цель которого заключается в нахождении такого варианта организации строительных работ, который позволит обеспечить эффективное использование ресурсов и завершить строительство в заданные сроки. Основной вопрос, решаемый в процессе разработки календарного плана, — увязка строительных работ во времени и пространстве, т.е. определение сроков выполнения каждого вида работ на каждом фронте работ. Правила увязки во времени и пространстве зависят от метода организации. Поточные методы организации работ получили большое распространение во всех областях строительства, так как они обеспечивают равномерное выполнение, эффективное использование трудовых и материально-технических ресурсов, удовлетворительные сроки строительства. Характерная особенность поточных методов — создание специализированных отрядов для производства разных видов работ, другими словами, специализация ресурсов.

При проектировании организации деятельности по строительству группы сооружений на этапе застройки квартала гражданскими или промышленными объектами возникает задача обеспечения непрерывной работы выделенных специализированных строительных подразделений при одновременном соблюдении технологии и нормативных сроков возведения отдельных сооружений [1–3].

Если число сооружений около десяти или более и число узкоспециализированных подразделений пять и более, увязка функционирования подразделений, соблюдение технологии, сроков строительства сооружений и всей программы требуют применения специальных методов теории расписаний [4, 5].

Задача построения расписаний часто встречается при планировании следующих видов деятельности: производственной, управленческой, системы мониторинга и анализа данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В общей постановке задача теории расписаний сводится к формированию строительных потоков и определению маршрутов их движения по строящимся сооружениям.

Математически задачу можно описать матрицей $G = |g_{ij}|$, где g_{ij} — сроки выполнения специализированной работы j -го подразделения на i -ом сооружении. В качестве целевой функции можно принять минимум срока строительства всех сооружений квартала, минимум простоя специализированных подразделений и минимум продолжительности работы специализированных подразделений на квартальной стройке.

В качестве ограничений могут выступать директивные сроки строительства отдельных сооружений и стройки в целом, суммарные простои специализированных подразделений, методы поточной организации на отдельных сооружениях и на стройке в целом.

При организации поточного строительства всех сооружений квартала требуется обеспечить соблюдение разработанных поточных методов при возведении каждого отдельного сооружения и сформировать специализированные потоки по всей квартальной стройке [6, 7]. Тогда, описывая матрицей A работу специализированных подразделений на квартальной стройке, следует учитывать поточную организацию работ по строительству каждого отдельного сооружения [8–10].

Поточную организацию работ на каждом сооружении также можно описать матрицей $T_i = |t_{ij}|$, где t_{ij} — сроки выполнения специализированной работы j -го подразделения на первой захватке i -го сооружения.

Для осуществления необходимых расчетов основных параметров комплексного потока по строительству сооружений квартала на основе начальных и конечных временных показателей по каждому специализированному потоку на каждом отдельном сооружении стоит сформировать общую матрицу GP комбинированного квартального потока.

Таким образом, после формирования всех n матриц T формируется расчетная матрица комбиниро-

ванного потока GP с выбором полученных сроков по матрицам T .

Матричная модель позволит рассчитать планируемые сроки начала и окончания работ на каждом частном фронте и оценить сроки выполнения комплексов работ различными методами: метод критического пути, метод непрерывного использования трудовых и технических ресурсов, метод непрерывного освоения частных фронтов работ, поточная организация работ по методу рангов [11–17].

Метод возведения отдельных сооружений при поточной организации работ зависит от проектных и конструктивных решений, от возможности строительных организаций и от принятых договорных сроков. Поток с непрерывным использованием трудовых и технических ресурсов более актуален для монолитных конструкций, для панельного строительства рационально использовать метод непрерывного освоения частных фронтов работ, для кирпичных сооружений подойдет метод критического пути. Часто заложенные сроки заставляют переходить в любом случае на метод критического пути.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера формирования комбинированного потока рассмотрим строительство восьми сооружений в составе квартальной застройки.

Основные комплексы работ и, соответственно, специализированные бригады сведены в табл. 1. Для каждого сооружения используется конкретный комплекс работ.

На основании выполненных расчетов трудоемкости работ, учета производительности и состава бригад были получены матрицы $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$, отражающие поточную организацию работ.

Первое сооружение — 10-этажное жилое здание состоит из пяти блоков, образуя пять отдельных фронтов работ (захваток). Матрица T_1 , отражающая поточную организацию работ по методу критического пути, представлена в табл. 2. В матрице указаны сроки начала и окончания работ.

Второе сооружение представляет собой также 12-этажное жилое здание, состоящее из четырех блоков. Матрица T_2 показана в табл. 3 и отражает поточную организацию работ по методу рангов (законченных этапов работ). Здесь t_i — продолжительность работы на сооружении специализированного подразделения.

Третье сооружение представляет собой аналогичное второму 12-этажное жилое здание. Матрица T_3 приведена в табл. 4 и отражает поточную организацию работ по методу непрерывного использования трудовых и технических ресурсов.

Четвертое сооружение — 18-этажное жилое здание, состоящее из трех блоков. Матрица T_4 представлена в табл. 5 и отражает сроки выполнения работ при поточной организации по методу непрерывного освоения частных фронтов работ.

Пятое сооружение предназначено для организации детского сада и состоит из двух частей (блоков). Здание кирпичное двухэтажное возводится на обычных ленточных фундаментах. В этой связи работа Б отсутствует, но возникает другая работа Ж.

Табл. 1. Основные комплексы работ

Table 1. Basic sets of works

Обозначение комплекса работ Notation of a set of works	Комплекс работ Set of works
А A	Земляные работы и устройство котлована под сооружение Earthworks, foundation pit excavation
Б B	Устройство свайного основания, выполнение ростверка и фундаментной плиты Construction of the piled foundation, the foundation framework and slab
В C	Выполнение нулевого цикла и подготовительных работ для возведения надземной части сооружения сборно-монолитной конструкции Performance of zero-cycle and preparatory works needed for the construction of the superstructure of a prefabricated monolithic construction
Г D	Возведение надземной части сооружения сборно-монолитной конструкции Construction of the superstructure of a prefabricated monolithic construction
Д E	Выполнение обустройства сооружения (перегородки, дверные и оконные проемы) и отделочных работ Fit-out (partitions, door and window openings) and finishing works
Е F	Выполнение наружных работ (крыльцо, отмостка, фасад) и благоустройство территории Exterior works (porch, blind area, facade) and landscaping
Ж G	Выполнение кирпичной кладки стен и перегородок, т.е. возведение кирпичного здания The bricking of walls and partitions, or the construction of a brick building

Табл. 2. Матрица T1 (поточная организация работ по методу критического пути)

Table 2. Matrix T1 (workflow organization using the critical path method)

Захватка Work zone	Работа / Work					
	A / A	Б / B	В / C	Г / D	Д / E	Е / F
1	0–6	6–14	14–20	20–66	66–102	102–112
2	6–10	14–22	22–30	66–118	118–152	152–164
3	10–15	22–32	32–38	118–164	164–200	200–213
4	15–20	32–40	40–49	164–201	201–243	243–253
5	20–27	40–52	52–61	201–249	249–283	283–294
t_i	0–27	6–52	14–61	20–249	66–283	102–294

Табл. 3. Матрица T2 (поточная организация работ по методу рангов)

Table 3. Matrix T2 (workflow organization using the ranking method)

Захватка Work zone	Работа / Work					
	A / A	Б / B	В / C	Г / D	Д / E	Е / F
1	0–5	5–12	12–18	21–75	75–118	125–135
2	5–11	12–21	21–29	75–125	125–164	181–190
3	12–16	21–29	75–81	125–181	181–221	236–248
4	21–27	75–85	125–133	181–236	236–280	280–290
t_i	0–27	5–85	12–133	21–236	75–280	125–290

Табл. 4. Матрица T3 (поточная организация работ по методу непрерывного использования трудовых и технических ресурсов)

Table 4. Matrix T3 (workflow organization using the method of continuous use of workforce and technical resources)

Захватка Work zone	Работа / Work					
	A / A	Б / B	В / C	Г / D	Д / E	Е / F
1	0–5	5–12	19–25	25–79	108–151	243–253
2	5–11	12–21	25–33	79–129	151–190	253–262
3	11–15	21–29	33–39	129–185	190–230	262–274
4	15–21	29–39	39–47	185–230	230–274	274–284
t_i	0–21	5–39	19–47	25–230	108–274	243–284

Табл. 5. Матрица T4 (поточная организация работ по методу непрерывного освоения частных фронтов работ)

Table 5. Matrix T4 (workflow organization using the method of continuous performance of particular scopes of work)

Захватка Work zone	Работа / Work					
	A / A	Б / B	В / C	Г / D	Д / E	Е / F
1	0–7	7–16	16–23	23–95	95–157	157–162
2	74–80	80–88	88–95	95–171	171–225	225–240
3	149–154	154–163	163–171	171–241	241–298	298–312
t_i	0–154	7–163	16–171	23–241	95–298	157–312

Соответственно, работа Г тоже отсутствует. Матрица Т5 приведена в табл. 6 и отражает поточную организацию работ по методу непрерывного использования ресурсов.

Шестое сооружение — трехэтажное кирпичное здание школы, состоящее из трех блоков. Матрица Т6 представлена в табл. 7 и отражает сроки выполнения работ при поточной организации по методу критического пути.

Седьмое сооружение — также трехэтажное кирпичное здание, состоящее из трех блоков. Здание предназначено для коммунально-бытового обслу-

живания населения. Матрица Т7 показана в табл. 8 и отражает сроки возведения здания поточным методом по методу рангов (законченных этапов работ).

Восьмое сооружение предназначено для осуществления медицинского обслуживания населения. Здание поликлиники возводится в сборно-монолитном исполнении. Это — четырехэтажное сооружение, состоящее из трех блоков. Матрица Т8 представлена в табл. 9 и характеризует сроки возведения здания поточным способом по методу непрерывного освоения фронтов работ.

Табл. 6. Матрица Т5 (поточная организация работ по методу непрерывного использования ресурсов)

Table 6. Matrix Т5 (workflow organization based on the method of continuous use of resources)

Захватка Work zone	Работа / Work				
	A / A	B / C	Ж / G	Д / E	Е / F
1	0–7	7–19	19–57	71–99	115–129
2	7–15	19–33	57–99	99–129	129–147
t_i	0–15	7–33	19–99	71–129	115–147

Табл. 7. Матрица Т6 (поточная организация работ по методу критического пути)

Table 7. Matrix Т6 (workflow organization using the critical path method)

Захватка Work zone	Работа / Work				
	A / A	B / C	Ж / G	Д / E	Е / F
1	0–7	7–20	20–59	56–84	84–97
2	7–15	20–35	59–101	101–133	133–148
3	15–23	35–49	101–139	139–169	169–183
t_i	0–23	7–49	20–139	56–169	84–183

Табл. 8. Матрица Т7 (поточная организация работ по методу рангов)

Table 8. Matrix Т7 (workflow organization using the ranking method)

Захватка Work zone	Работа / Work				
	A / A	B / C	Ж / G	Д / E	Е / F
1	0–8	8–22	22–60	60–85	102–112
2	8–16	22–34	60–102	102–130	142–154
3	22–29	60–74	102–142	142–168	168–179
t_i	0–29	8–74	22–142	60–168	102–179

Табл. 9. Матрица Т8 (поточная организация работ по методу непрерывного освоения фронтов работ)

Table 9. Matrix Т8 (workflow organization using the method of continuous performance of particular scopes of work)

Захватка Work zone	Работа / Work				
	A / A	B / C	Ж / G	Д / E	Е / F
1	0–7	7–23	23–43	43–67	67–81
2	21–30	30–45	45–67	67–89	89–106
3	49–57	57–69	69–89	89–112	112–127
t_i	0–57	7–69	23–89	43–112	67–127

Для осуществления расчетов основных параметров комплексного потока необходимо объединить все восемь сооружений с помощью матрицы GP . При этом для объединения отдельных частных потоков по всем сооружениям в один общий определим смещение между каждыми двумя частными потоками для организации общего квартального потока по каждому специализированному потоку. Такую матрицу GP определим как матрицу смещения.

Размер смещения устанавливается для каждого смежных сооружений каждого специализированного потока. Смещение D равно разности между сроком окончания работ на предыдущем сооружении и сроком начала работ на последующем. Смещение D характеризует возможность начать последующую специализированную работу сразу после окончания предыдущей, т.е. возможность организовать непрерывный поток по каждому виду строительных работ на квартальном комплексе возводимых сооружений.

С помощью сформированной матрицы смещения GP можно рассчитать следующие показатели комплексного квартального потока:

Продолжительность работы каждого специализированного потока по выполнению работ на всех сооружениях квартала без учета возможности организации потоков по другим специализированным потокам:

$$T_j = \sum_{i=1}^n D_{ji} + t_{jn} - t_{j1}, \quad (1)$$

где t_{jn} — срок окончания на последнем сооружении j -й работы; t_{j1} — срок начала на первом сооружении j -й работы; n — число рассматриваемых сооружений при поточной организации застройки квартала.

Продолжительность работы каждого специализированного подразделения при организации ком-

плексного потока при строительстве сооружений квартала без совмещения однотипных работ, т.е. без наличия возможности одновременной работы специализированного подразделения на нескольких сооружениях.

В этом случае организация движения всех m специализированных подразделений определяется максимальным значением D для каждой пары смежных сооружений:

$$TP_j = \sum_{i=1}^n \max_{j=1}^m D_{ji} + t_{jn} - t_{j1}. \quad (2)$$

Продолжительность завершения каждого вида работ при организации потока по всем сооружениям квартальной застройки:

$$TZ_j = TP_j + t_{j1}. \quad (3)$$

Продолжительность выполнения всех работ по строительству квартала:

$$TZ_k = \max TZ_j \text{ или } TZ_k = TZ_m. \quad (4)$$

Простой каждой специализированной бригады:

$$R_j = TP_j - T_j. \quad (5)$$

Теоретический предельно возможный минимум продолжительности работы комплексного потока по возведению сооружений квартала при организации любой очередности включения сооружений в поток:

$$\min TZ_k = \max_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (t_{jik} - t_{jih}) + \min_{i=1}^n t_{jih}, \quad (6)$$

где t_{jik} — срок окончания j -й работы на i -м сооружении; t_{jih} — срок начала j -й работы на i -м сооружении.

Смещения для вычисления сроков строительства сооружений квартала представлены в табл. 10.

Табл. 10. Матрица смещения GP для вычисления сроков строительства сооружений квартала

Table 10. GP displacement matrix used to analyze the term of construction of buildings that represent a quarter

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	B B	B C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
1	0–27	6–52	14–61	20–249	—	66–283	102–294	—
D	27	47	49	228	—	208	163	228
2	0–27	5–85	12–133	21–236	—	75–280	125–290	—
D	27	80	114	211	—	172	47	211
3	0–21	5–39	19–47	25–230	—	108–274	243–284	—
D	21	32	31	207	—	179	134	207
4	0–154	7–163	16–171	23–241	—	95–298	150–312	—
D	154	—	157	—	—	227	197	227
5	0–15	—	12–39	—	19–99	71–129	115–147	—

Окончание Табл. 10 / End of Table 10

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
D	15	—	32	—	79	73	63	79
6	0–23	—	7–49	—	20–139	56–169	84–183	—
D	23	—	41	—	117	109	81	117
7	0–29	—	8–74	—	22–142	60–168	102–139	—
D	29	—	67	(218)	—	125	112	125
8	0–57	—	7–69	23–89	—	43–112	67–127	—
T_j	347	316	546	933	319	1139	822	1194
TP_j	1251	803	1249	1263	319	1240	1219	—
R_{ij}	904	487	703	330	0	101	397	2922

Для матрицы GP получаем:

$$TЗ_K = 1194 + 127 = 1321,$$

$$\min TЗ_K = 1139 + 43 = 1182.$$

Рассмотрение результатов сформированного комплексного потока, отраженного на матрице смещения GP , показывает наличие значительного объема простоев по каждому специализированному потоку. Эти простои приводят к существенным экономическим потерям даже при периодической передислокации трудовых и технических ресурсов на другие объекты для обеспечения трудовой занятости в период перехода с одного сооружения на другое. Для снижения объема простоев и экономических потерь возможно применение двух основных способов реорганизации комплексного квартального потока:

Способ определения оптимальной очередности включения в комплексный поток сооружений квартальной застройки.

При этом разработанная ранее технология и организация работ на каждом сооружении остается неизменной. Продолжительность строительства каждого сооружения и принятый график включаются в комплексный поток без корректировок.

Способ определения оптимальной очередности включения в комплексный поток сооружений квартальной застройки и последующего смещения специализированных потоков на каждом сооружении для исключения простоев при переходе с одного сооружения на последующее.

В этом случае технология и организация работ по каждому специализированному потоку на каждом сооружении остаются неизменными. Продолжительность строительства каждого сооружения и всего комплексного потока увеличивается. При этом каждый специализированный поток после включения в рассчитанный срок в комплексный по-

ток работает по квартальной застройке без простоев, т.е. непрерывно.

Для реализации любого из рассмотренных способов организации оптимальных или рациональных комплексных квартальных потоков необходимо определение соответствующей очередности включения сооружений в поток.

Основным методом формирования оптимального комплексного потока можно считать метод ветвей и границ [18–21].

Сущность формирования рациональной (оптимальной) очередности включения сооружений в комплексный поток на основе метода ветвей и границ заключается в направленном переформировании матрицы смещения GP . Переформирование матрицы производится с целью минимизации общей продолжительности квартальной застройки, минимизации простоев специализированных подразделений (бригад) и определения соответствующих сроков начала и окончания всех работ на всех сооружениях.

Алгоритм ветвления заключается в построении порфириана для поиска конечного решения. Порфириан представляет собой граф, отражающий возможные решения на $n - 1$ уровнях. На первом уровне рассматриваются варианты решения по построению переформированной матрицы с поочередной установкой на первое место всех n сооружений. На нулевом уровне находится исходная матрица смещения GP с полученным первоначальным сроком строительства квартала. На первом уровне находится n вариантов решений, для которых необходимо определить предельно возможные минимальные продолжительности выполнения всего комплекса работ. Дальнейшее развитие порфириана осуществляется по направлению минимально возможной продолжительности застройки квартала, а найденное сооружение является первым в развитии комплексного потока. Минимально возможная

продолжительность завершения строительства сооружений квартала и является границей окончания рассмотрения вариантов решений на данном уровне и определяет путь развития порфириана.

Второй уровень порфириана развивается от первого сооружения, предполагающего в конечном варианте самую минимальную продолжительность строительства всех сооружений квартала. Второй уровень порфириана отражает варианты формирования второй строки искомой матрицы смещения, т.е. варианты определения второго сооружения, которое должно быть включено в комплексный квартальный поток. Таких возможных решений будет $n - 1$. Для всех $n - 1$ возможных решений аналогичным образом определяется минимально возможная продолжительность строительства квартала и дальнейшее развитие порфириана.

В окончательном варианте весь рассчитанный порфириан представлен на рисунке.

Для выявления границ по ходу развития ветвей целесообразно формулу (5) преобразовать к следующему виду:

$$\min T_{3_{Kq}} = \max_{j=1}^m T_{3_j} + \sum_{i=1}^n (D \max_i - D i_j) + t_{mnk} - t_{jnk}. \quad (7)$$

По ходу развития ветвей порфириана на рисунке производится вычисление значений $T_{3_{ij}}$ на каждом шаге. По полученным результатам выбирается минимальное значение для построения следующе-

го шага. Для определения первого шага ветвления (определения первого сооружения для начала движения специализированных потоков) необходимо установить вид специализированного потока, определяющего максимальное время выполнения данного вида работ без простоя трудовых ресурсов.

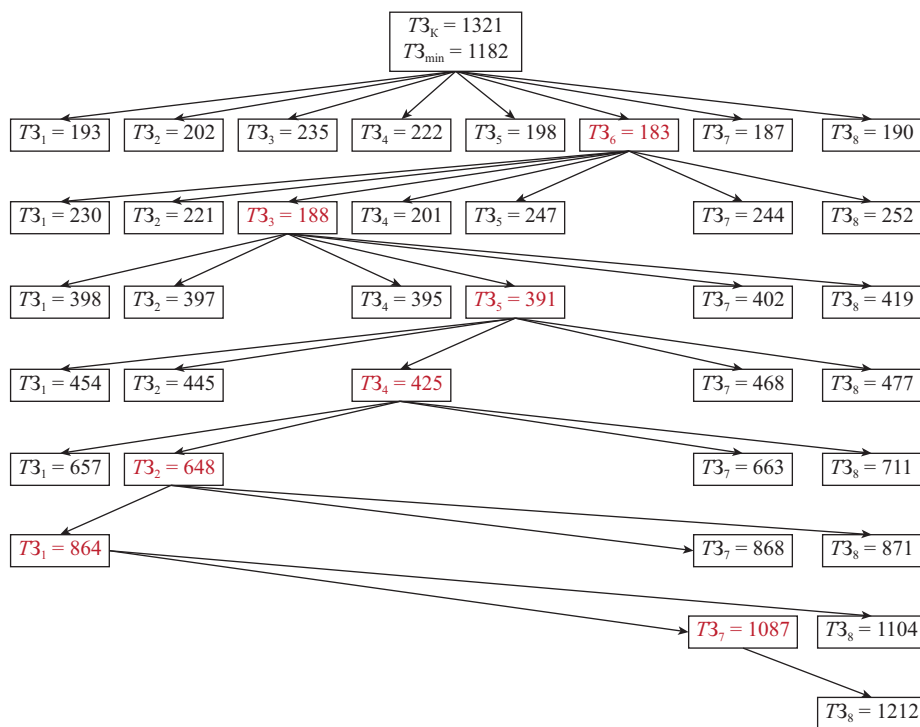
По видам специализированных работ получаем следующие продолжительности T_j (1):

$$A = 347 \text{ дн.}; B = 316 \text{ дн.}; V = 548 \text{ дн.}; \\ \Gamma = 933 \text{ дн.}; Ж = 319 \text{ дн.}; Д = 1139 \text{ дн.}; E = 828 \text{ дн.}$$

Продолжительность возведения всех сооружений квартала прежде всего определяется рассмотренным максимальным значением $T_7 = 1139$ дн. и сроком начала этого потока. Тогда

$$\min T_{3_K} = 1139 + (\min t_{7mh} = 43) = 1182.$$

Однако, поскольку последний специализированный поток начинается позже всех предыдущих, то он также может определять окончательную продолжительность всего квартального потока (выражение (3) и (4)). В этой связи по седьмому потоку первым этапом должно быть сооружение с минимальным значением начала, а по последнему потоку на последнем шаге должно стоять сооружение с минимальным значением окончания работ. Так как тот и другой минимум принадлежат одному восьмому сооружению, то минимальной суммой обладают шестое сооружение на первом месте и восьмое на последнем: $56 + 127 = 183$.



Порфириан формирования рациональной (оптимальной) очередности развития комплексного квартального потока по возведению восьми сооружений

The Porphyrian tree describing the rational (optimal) sequencing of an integrated quarterly workflow for the construction of eight buildings

Для построения первого уровня порфириана определяем сумму начала седьмого потока и окончание восьмого для каждого сооружения (см. порфириан):

$$TZ_{i(1)} = t_{7ih} + \min t_{8ik}.$$

После определения сооружения на первом уровне с минимальным значением $TZ_6 = 183$ для оценки дальнейшего ветвления воспользуемся следующим выражением:

$$TZ_{i(q)} = TZ_{i(q-1)} + \max D_{ji}.$$

Согласно сформированному ранее порфириану, получаем следующую матрицу смещения и соответствующий срок завершения всех работ по строительству сооружений квартала.

Смещения для расчета сроков строительства сооружений по порфириану приведены в табл. 11.

$$TZ_K = 1085 + 127 = 1212.$$

Расчет сроков строительства сооружений по методу критического пути представлен в табл. 12.

Расчет сроков строительства сооружений по методу непрерывного использования ресурсов представлен в табл. 13.

Табл. 11. Смещения для вычисления сроков строительства сооружений по порфириану

Table 11. Displacements applied to the construction term analysis performed using the Porphyrian tree

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
6	0–23	—	7–49	—	20–139	56–169	84–183	—
D	23	—	30	—	—	61	–60	61
3	0–21	5–39	19–47	28–230	—	108–274	243–284	—
D	21	—	35	—	(120)	203	169	203
5	0–15	—	12–39	—	19–99	71–129	115–147	—
D	15	(32)	23	(207)	—	34	–3	34
4	0–154	7–163	16–171	23–241	—	95–298	150–312	—
D	154	158	159	220	—	223	187	223
2	0–27	5–85	12–133	21–236	—	75–280	125–290	—
D	27	79	119	216	—	214	188	216
1	0–27	6–52	14–61	20–249	—	66–283	102–294	—
D	23	—	53	—	(77)	223	192	223
7	0–29	—	8–74	—	22–142	60–168	102–179	—
D	29	—	67	(226)	–	125	112	125
8	0–57	—	7–69	23–89	–	43–112	67–127	—
T_j	343	316	548	930	319	1195	828	1085
TP_j	1142	723	1154	1174	1082	1197	1002	—
R_j	799	407	606	244	763	2	174	2995

Табл. 12. Расчет сроков строительства сооружений по методу критического пути

Table 12. Construction term analysis using the critical path method

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
6	0–23	—	7–49	—	20–139	56–169	84–183	—
D	23	—	30	—	—	61	–60	61
3	23–44 0–21	5–39 5–39	49–77 19–47	58–260 28–230	—	169–335 108–274	304–345 243–284	—

Окончание Табл. 12 / End of Table 12

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
D	21	—	35	—	(120)	203	169	203
5	44–59 0–15	—	77–104 12–39	—	139–219 19–99	335–393 71–129	379–411 115–147	—
D	15	(32)	23	(207)	—	34	–3	34
4	59–213 0–154	66–222 7–163	104–259 16–171	260–478 23–241	—	393–596 95–298	448–610 150–312	—
D	154	158	159	220	—	223	187	223
2	213–240 0–27	222–302 5–85	259–380 12–133	478–693 21–236	—	596–801 75–280	646–811 125–290	—
D	27	79	119	216	—	214	188	216
1	240–267 0–27	302–348 6–52	380–427 14–61	693–922 20–249	—	801–1018 66–283	837–1029 102–294	—
D	27	—	53	—	(77)	223	192	223
7	267–296 0–29	—	427–493 8–74	—	441–561 22–142	1018–1126 60–168	1060–1137 102–179	—
D	29	—	67	(226)	—	125	112	125
8	296–353 0–57	—	493–555 7–69	922–988 23–89	—	1126–1195 43–112	1150–1210 67–127	—
T_j	347	316	548	930	319	1139	828	1085
TP_j	347	343	548	930	541	1139	1126	—
R_{ij}	0	27	0	0	222	0	298	547

Табл. 13. Расчет сроков строительства сооружений по методу непрерывного использования ресурсов

Table 13. Construction term analysis using the method of continuous use of resources

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
6	0–23	—	7–49	—	242–361 20–139	278–391 56–169	604–703 84–183	—
D	23	—	30	—	—	61	–60	61
3	23–44 0–21	32–66 5–39	49–77 19–47	58–260 28–230	—	391–557 108–274	703–744 243–284	—
D	21	—	35	—	(120)	203	169	203
5	44–59 0–15	—	77–104 12–39	—	361–441 19–99	557–615 71–129	744–776 115–147	—
D	15	(32)	23	(207)	—	34	–3	34
4	59–213 0–154	66–222 7–163	104–259 16–171	260–478 23–241	—	615–818 95–298	776–938 150–312	—
D	154	158	159	220	—	223	187	223
2	213–240 0–27	222–302 5–85	259–380 12–133	478–693 21–236	—	818–1023 75–280	938–1103 125–290	—
D	27	79	119	216	—	214	188	216

Окончание Табл. 13 / End of Table 13

Здание Building	Работа / Work							maxD, дни maxD, days
	A A	Б B	В C	Г D	Ж G	Д E	Е F	
1	240–267 0–27	302–348 6–52	380–427 14–61	693–922 20–249	—	1023–1240 66–283	1103–1295 102–294	—
D	27	—	53	—	(77)	223	192	223
7	267–296 0–29	—	427–493 8–74	—	441–561 22–142	1240–1348 60–168	1295–1372 102–179	—
D	23	—	67	(226)	—	125	112	125
8	296–353 0–57	—	493–555 7–69	922–988 23–89	—	1348–1417 43–112	1372–1432 67–127	—
T_j	347	316	548	930	319	1139	828	1085
TP_j	347	316	548	930	319	1139	828	—
R_{ij}	0	0	0	0	0	0	0	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение исходной и оптимизированной матрицы по методу ветвей и границ показало, что срок возведения всех сооружений квартала сократился с 1321 дня до 1212 дней, но увеличился общий простой специализированных подразделений.

К недостаткам организации строительства всех сооружений квартала при рационализации последовательности включения сооружений в комплексный поток следует отнести перерывы (простои) в работе специализированных строительных подразделений (бригад). Перерывы в работе бригад приводят к существенным экономическим затратам и потерям. В этой связи целесообразно после прихода специализированных подразделений на строительство квартала обеспечить их непрерывную работу до полного завершения всех технологических процессов данного вида.

Для сохранения просчитанной по каждому сооружению определенной технологии требуется либо использовать две или три бригады по наиболее загруженным видам работ, либо за счет увеличения сроков строительства отдельных сооружений без изменения технологии их возведения добиться непрерывной работы специализированных подразделений. В этом случае необходимо организовать комплексный поток по строительству сооружений квартала или по методу критического пути, или, как правило, более эффективно, по методу непрерывного использования ресурсов.

На основе сформированной рациональной (оптимальной) очередности строительства сооружений квартала, обеспечивающей минимальный срок всего строительства, за счет увеличения продолжительности возведения каждого сооружения можно обеспечить дополнительное сокращение сроков строительства (метод критического пути) или полное от-

сутствие простоев специализированных бригад (метод непрерывного использования ресурсов).

Рассмотрим достоинства и недостатки каждого метода на основе приведенного ранее примера.

Метод критического пути при организации комплексного потока по строительству сооружений заданного квартала предусматривает увеличение разрыва между смежными потоками на каждом сооружении для достижения минимального срока завершения строительства всех сооружений квартала. Увеличение разрыва в сроках начала работ смежных потоков на сооружениях приводит к увеличению продолжительности их строительства и, соответственно, к дополнительным затратам по сооружениям. Но сокращение простоев специализированных бригад, в свою очередь, ведет к значительному сокращению затрат по их содержанию на квартальной площадке строительства.

По таблице расчетов сроков выполнения работ по методу критического пути можно установить резкое сокращение простоев техники и специализированных бригад. Вместо суммарного простоя в 2995 дней возникает суммарный простой в 547 дней. Ряд специализированных подразделений работают полностью непрерывно. Однако по данному методу происходит резкое увеличение продолжительности строительства каждого сооружения. Так, первое сооружение можно построить за 294 дня, а по полученному графику строительства сооружений квартала планируется строить 789 дней. Критический путь показан на таблице цветом. Общая продолжительность строительства квартала сокращается на два дня.

По таблице расчетов сроков выполнения работ по методу непрерывного выполнения работ (без простоев трудовых и технических ресурсов) ощутимо увеличивается продолжительность строительства всех сооружений квартала до 1432 дней. При

этом также увеличиваются сроки строительства каждого сооружения. Так, например, первое сооружение строится по данному методу 1055 дней.

Общий метод согласования работы организаций при квартальной застройке — сводный поток с отображением в матрице. Расчет по срокам и методам — в зависимости от установок и требований

правительства города (метод критического пути, метод непрерывного использования трудовых и технических ресурсов, метод непрерывного освоения частных фронтов работ), для оптимизации полученных матриц рекомендуется использовать представленный метод ветвей и границ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширишков Б.Ф., Огнев И.А., Степанова В.С. Методика графической оценки и анализа оптимальной последовательности квартальной застройки жилых домов // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 47–51.
2. Семенов М.Ф. Формирование организационно-производственной модели строительства квартальной комплексной городской застройки // Обеспечение качества строительства в г. Москве на основе современных достижений науки и техники : сб. тр. Первой совместной науч.-практ. конф. ГБУ «ЦЭ-ИИС» и ИПРИМ РАН. М., 2019. С. 242–257.
3. Челнокова В.М. Организация комплексной застройки населенных мест // Петербургская школа поточной организации строительства : I Всеросс. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения проф. Виктора Алексеевича Афанасьева. СПб., 2018. С. 11–16.
4. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26. № 3. С. 5–50. DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(3)-1
5. Kalugin Y.B. Universal method for calculation of reliable completion times // Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 67. Issue 07. Pp. 70–80. DOI: 10.5862/MCE.67.7
6. Mailyan A., Afanasiev G., Antoniadis D., Petrosyan R. Formation of optimal performance of works during establishment of the complex of objects optimal sequence of establishing objects complex building // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. P. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012053
7. Kuzhin M., Akimockina M. Optimization of construction parameters using resource scheduling // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06030. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706030
8. Иванов М.Ю. Автоматизация сетевого планирования и управления // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 63–69.
9. Величкин В.З., Петроченко М.В., Птухина И.С. Матрично-сетевая модель планирования сложных комплексов работ // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 13–17.
10. Владимиров И.И. Применение матричного алгоритма расчета продолжительности строительства монолитных зданий с использованием поточной организации строительного производства // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 4 (82). С. 89–96.
11. Бовтеев С.В. Расчет параметров поточной организации работ методом критического пути // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 90–97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-90-97
12. Selvam G., Madhavi T.Ch., Begum T.P.N., Sudheesh M. Impact of labour productivity in estimating the duration of construction projects // International Journal of Construction Management. 2020. Pp. 1–7. DOI: 10.1080/15623599.2020.1790475
13. Chakraborty R.K., Sarker R.A., Essam D.L. Resource constrained project scheduling with uncertain activity durations // Computers & Industrial Engineering. 2017. Vol. 112. Pp. 537–550. DOI: 10.1016/j.cie.2016.12.040
14. Bruni M.E., Pugliese L.D.P., Beraldi P., Guerriero F. A computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem // Computers & Operations Research. 2018. Vol. 99. Pp. 178–190. DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.016
15. Rahman H.F., Chakraborty R.K., Ryan M.J. Memetic algorithm for solving resource constrained project scheduling problems // Automation in Construction. 2020. Vol. 111. P. 103052. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103052
16. Hajdu M. Survey of precedence relationships: Classification and algorithms // Automation in Construction. 2018. Vol. 95. Pp. 245–259. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.012
17. Kim S.-G. CPM schedule summarizing function of the beeline diagramming method // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2012. Vol. 11. Pp. 367–374. DOI: 10.3130/jaabe.11.367
18. Ревчук И.Н., Пчельник В.К. Реализация алгоритма ветвей и границ в MS EXCEL // Технологии информатизации и управления. 2011. № 2. С. 196–202.
19. Geldsetzer L., Schwartz R.L. Logical thinking in the pyramidal schema of concepts: The logical and mathematical elements. 2013. Pp. 1–137.

20. Князева М.В. Метод ветвей и границ для решения задачи сетевого планирования с ограниченными ресурсами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7 (108). С. 78–84.

21. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. Project Sheduling: a research handbook. Kluwer Academic Publishers, 2002. 685 p.

Поступила в редакцию 31 октября 2020 г.

Принята в доработанном виде 15 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Захарович Величкин** — доктор технических наук, профессор, тьютор, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 549927, Scopus: 57191527027, ResearcherID: AAI-4839-2020, ORCID: 0000-0003-0423-4958; v.velichkin2011@yandex.ru;

Марина Вячеславовна Петроченко — кандидат технических наук, доцент, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, РИНЦ ID: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: AAI-9992-2020, ORCID: 0000-0002-4865-5319; mpetrochenko@mail.ru;

Ксения Игоревна Стрелец — кандидат технических наук, доцент, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, РИНЦ ID: 617762, Scopus: 56236887100, ResearcherID: AAI-9037-2020, ORCID: 0000-0002-5975-139X; kstrelets@mail.ru;

Евгения Борисовна Заводнова — старший преподаватель, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, РИНЦ ID: 624134, Scopus: 56233560200, ResearcherID: AAZ-4998-2020, ORCID: 0000-0001-9517-609X; yavtushenko_eb@spbstu.ru;

Анна Юрьевна Гороdishенина — ассистент, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 536990, ResearcherID: AAE-8520-2020, ORCID: 0000-0002-6901-3040; gorodish_ayu@spbstu.ru.

REFERENCES

1. Shirshikov B.F., Ognev I.A., Stepanova V.S. Technique of a graphic assessment and analysis of optimum sequence of development by blocks of residential buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 10:47-51. (rus.).

2. Semenenko M.F. Formation of an organizational and production model for the construction of a quarterly integrated urban development. *Ensuring the quality of construction in Moscow based on modern achievements of science and technology : Proceedings of the First Joint Scientific and Practical Conference of the State Budgetary Institution "CEIIS" and IPRIM RAS*. Moscow, 2019; 242-257. (rus.).

3. Chelnokova V.M. Organization of complex development of populated areas. *Petersburg school production organization of construction : I All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 95th anniversary of the birth of Professor Viktor Alekseevich Afanasyev*. St. Petersburg, 2018; 11-16. (rus.).

4. Anichkin A.S., Semenov V.A. A survey of emerging models and methods of scheduling. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. 2014; 26(3):5-50. DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(3)-1 (rus.).

5. Kalugin Y.B. Universal method for calculation of reliable completion times. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 67(07):70-80. DOI: 10.5862/MCE.67.7

6. Mailyan A., Afanasiev G., Antoniadi D., Petrosyan R. Formation of optimal performance of works during establishment of the complex of objects optimal sequence of establishing objects complex building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 896:012053. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012053

7. Kuzhin M., Akimockina M. Optimization of construction parameters using resource scheduling. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06030. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706030

8. Ivanov M.Yu. Automation of network planning and management. *Systems. Methods. Technologies*. 2013; 2(18):63-69. (rus.).

9. Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Ptuhina I.S. Matrix-network model of planning complex work packages. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2019; 669:13-17. (rus.).

10. Vladimirov I.I. The matrix algorithm to calculate the construction cycle duration for monolithic buildings using the flow organization of construction

operations. *Science and Business: Ways of Development*. 2018; 4(82):89-96. (rus.).

11. Bovteev S.V. Calculation of the parameters of the streamline work organization by the critical path method. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 3(68):90-97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-90-97 (rus.).

12. Selvam G., Madhavi T.Ch., Begum T.P.N., Sudheesh M. Impact of labour productivity in estimating the duration of construction projects. *International Journal of Construction Management*. 2020; 1-7. DOI: 10.1080/15623599.2020.1790475

13. Chakraborty R.K., Sarker R.A., Essam D.L. Resource constrained project scheduling with uncertain activity durations. *Computers & Industrial Engineering*. 2017; 112:537-550. DOI: 10.1016/j.cie.2016.12.040

14. Bruni M.E., Pugliese L.D.P., Beraldi P., Guerriero F. A computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem. *Computers & Operations Research*. 2018; 99:178-190. DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.016

15. Rahman H.F., Chakraborty R.K., Ryan M.J. Memetic algorithm for solving resource constrained project scheduling problems. *Automation in Con-*

struction. 2020; 111:103052. DOI: 10.1016/j.aut-con.2019.103052

16. Hajdu M. Survey of precedence relationships: Classification and algorithms. *Automation in Construction*. 2018; 95:245-259. DOI: 10.1016/j.aut-con.2018.08.012

17. Kim S.-G. CPM Schedule Summarizing Function of the Beeline Diagramming Method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2012; 11:367-374. DOI: 10.3130/jaabe.11.367

18. Revchuk I.N., Pchelnik V.K. Implementation of the branch and bound algorithm in MS EXCEL. *Informatization and Management Technologies*. 2011; 2:196-202. (rus.).

19. Geldsetzer L., Schwartz R.L. *Logical thinking in the pyramidal schema of concepts: The logical and mathematical elements*. 2013; 1-137.

20. Knyazeva M.V. A branch-and-bound procedure for solving resource-constrained project scheduling problem. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2010; 7(108):78-84. (rus.).

21. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. *Project Scheduling: a research handbook*. Kluwer Academic Publishers, 2002; 685.

Received October 31, 2020.

Adopted in revised form on December 15, 2020.

Approved for publication on December 28, 2020.

BIONOTES: **Victor Z. Velichkin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, tutor, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 549927, Scopus: 57191527027, ResearcherID: AAI-4839-2020, ORCID: 0000-0003-0423-4958; v.velichkin2011@yandex.ru;

Marina V. Petrochenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: AAI-9992-2020, ORCID: 0000-0002-4865-5319; mpetrochenko@mail.ru;

Ksenia I. Strelets — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 617762, Scopus: 56236887100, ResearcherID: AAI-9037-2020, ORCID: 0000-0002-5975-139X; kstrelets@mail.ru;

Evgeniya B. Zavodnova — senior lecturer, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 624134, Scopus: 56233560200, ResearcherID: AAZ-4998-2020, ORCID: 0000-0001-9517-609X; yavtushenko_eb@spbstu.ru;

Anna Yu. Gorodishenina — assistant, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 536990, ResearcherID: AAE-8520-2020, ORCID: 0000-0002-6901-3040; gorodish_ayu@spbstu.ru.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Рецензия на учебное пособие «Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью» (2020 г.)

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян

The review of the “Soil mechanics for high-rise buildings having sophisticated underground substructures” (2020) study guide

Z.G. Ter-Martirosyan, A.Z. Ter-Martirosyan

Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов первого курса, укрупненных групп бакалавров, магистров и аспирантов как дневной, так и заочной форм строительных вузов, и факультетов технических университетов по направлению подготовки 08.04.01 Строительство, в том числе Промышленное и гражданское строительство (ПГС), Гидротехнические и энергетические сооружения (ГС и ЭС).

Учебное пособие содержит краткое изложение основных положений и уравнений механики грунтов, включая математическое описание физических и механических свойств на основе результатов лабораторных и полевых экспериментов. Эти знания необходимы для обоснования выбора расчетных параметров фундаментов высотного строительства.

Также используются теоретические основы количественной оценки напряженно-деформированного состояния массива грунта, вмещающего подземную часть и подземные конструкции с учетом их взаимодействия в линейной и нелинейной постановках аналитическим и численным методами

с использованием ПК Mathcad и методом конечных элементов с применением ПК Plaxis и др.

Пособие поможет студентам получить навыки правильного и обоснованного применения изученного материала при решении задач средней сложности о взаимодействии подземных конструкций с фундаментом, сваями, ограждающими конструкциями котлованов, необходимых на стадии принятия проектных решений.

Учебное пособие адресовано студентам средних специальных и высших учебных заведений, обучающимся по программе бакалавриата по направлению «Строительство» и «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Пособие выполнено на хорошем методическом уровне, имеет практическую значимость, что позволяет рекомендовать авторов учебного пособия (доктора технических наук, профессора З.Г. Тер-Мартirosяна, доктора технических наук А.З. Тер-Мартirosяна) к выдвижению для участия в Конкурсе на медали и дипломы RAACH.

Владимир Игоревич Андреев,

доктор технических наук, профессор,
действительный член РААСН, заведующий кафедрой сопротивления материалов,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Вionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

