

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 12/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 15. Выпуск 12
2020

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

Сквозной номер 147

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 15. Issue 12
2020

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

«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: ric@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
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	24.12.2020.
Подписан в свет	28.12.2020.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 13,86. Тираж 100 экз. Заказ № 555	

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

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

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: ric@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
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	28.12.2020

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

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

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

Rolf Katzenbach, Doctor of Engineering, Professor, 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, Wroclaw 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. Tushin, 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

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

С.Н. Кривошапко, В.Н. Иванов

Поверхности конгруэнтных сечений на цилиндрах 1620

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

Л.А. Илларионова, А.А. Локтев

**Влияние волновых процессов на армирование плиты основания безбалластного
железнодорожного пути 1632**

А.З. Тер-Мартirosян, И.О. Исаев, А.С. Алмакаева

**Определение фактического коэффициента перебора
(участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица») 1644**

М.Н. Микова, Е.Н. Акбулякова

Исследование деформируемости глинистого грунта во времени. 1654

И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков

**К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов,
армированных композитной полимерной арматурой 1663**

А.В. Перельмутер, О.В. Кабанцев

О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства 1673

В.В. Филатов, Б.Ф. Кужин, Тхи Линь Куен Хоанг

Расчет двухслойной составной балки, свободно лежащей на упругом основании 1685

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

П.А. Журавлев, А.М. Марукян

Обоснование планируемой стоимости инвестиционно-строительных проектов. 1693

М.Ю. Викторov

Жилищное строительство в современных условиях торможения экономического роста 1708

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

В.А. Перфилов

Рецензия на учебное пособие «Фасадные строительные материалы» (2020 год) 1717

Требования к оформлению научной статьи. 1718

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

<i>Sergey N. Krivoschapko, Vyacheslav N. Ivanov</i> Surfaces of congruent sections on cylinders	1620
---	------

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

<i>Lilia A. Illarionova, Alexey A. Loktev</i> The influence of wave processes on the reinforcement of the base plate of a ballast-free railway track	1632
<i>Armen Z. Ter-Martirosyan, Ilya O. Isaev, Anastasia S. Almakaeva</i> Identification of the actual excess excavation ratio (Stakhanovskaya street – Nizhegorodskaya street site)	1644
<i>Marina N. Mikova, Evgeniya N. Akbulyakova</i> A study of clay soil deformability over time	1654
<i>Ilshat T. Mirsayapov, Igor A. Antakov, Alexey B. Antakov</i> The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars	1663
<i>Anatoly V. Perelmutter, Oleg V. Kabantsev</i> On conceptual provisions of design standards for earthquake-resistant construction	1673
<i>Vladimir V. Filatov, Bulat F. Kuzhin, Thi Linh Quyen Hoang</i> The analysis of a free two-layer composite beam on the elastic foundation	1685

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

<i>Pavel A. Zhuravlev, Artur M. Marukyan</i> Substantiation of projected costs of investment and construction projects	1693
<i>Mikhail Yu. Viktorov</i> Housing construction in the present-day context of decelerating economic growth	1708

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

<i>Vladimir A. Perfilov</i> The review of the “Building facade materials” (2020) study guide	1717
Requirements for research paper design	1718

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 applies 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

Вестник МГСУ — 2020: от количества к качеству

Vestnik MGSU — 2020: from quantity to quality

Уважаемые читатели, наш журнал на протяжении почти пятнадцати лет освещает актуальные проблемы строительной науки и архитектуры и занимает высокие позиции в отраслевых рейтингах, так, например, по итогам 2019 г. он занимает второе место в рейтинге Science Index по тематике «Строительство. Архитектура».

Как главный редактор, чувствую ответственность не только за оперативное распространение и освещение научных достижений в области строительных наук, но и за качество публикуемых исследований.

Определяя курс развития журнала на последующие годы, постепенно наращивая требования к материалам, конечной целью которых является более широкое распространение среди международного научного сообщества публикуемых результатов, ожидаю от авторских коллективов прорывных исследований в своих областях знаний, достойных международного признания. Следуя новым вызовам, осенью 2020 г. была произведена ротация состава редакционной коллегии и редакционного совета журнала.

Постепенный переход от количества публикаций к их качественному содержанию можно увидеть невооруженным взглядом, проведя анализ статистических данных за пять лет.

Подводя итоги 2020 г., можно сказать, что он оказался плодотворным на научные достижения, в нашем журнале было опубликовано 120 публикаций в 12 выпусках журнала, а наиболее популярной тематической рубрикой журнала стала «Проекти-

рование и конструирование строительных систем. Строительная механика. Основания и фундаменты, подземные сооружения».

	2015	2016	2017	2018	2019
Число статей в РИНЦ	188	153	161	134	117
Показатель журнала в рейтинге SCIENCE INDEX	0,175	0,243	0,786	1,233	1,443
Место журнала в рейтинге SCIENCE INDEX	1341	1189	408	256	247
Среднее число страниц в статье	9,8	10,4	7,9	10,2	11,7
Среднее число ссылок в списках цитируемой литературы	22	21	20	23	28
Средний индекс Хирша авторов	5,6	6,4	7	6,9	8,7

Хочу выразить огромную благодарность коллегам, научным рецензентам, авторам, редакторам за вклад в развитие журнала. Вы задали поистине высокий уровень качества.

Осенью 2021 г. НИУ МГСУ отметит свой столетний юбилей, а наш журнал — пятидесятилетний. В связи с этими двумя событиями хочу анонсировать конкурс на лучшую обзорную статью, который будет объявлен в следующем году.

*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), Moscow, Russian Federation*

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 514.75/77:514.8:72.01

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1620-1631

Поверхности конгруэнтных сечений на цилиндрах

С.Н. Кривошапко, В.Н. Иванов

Российский университет дружбы народов (РУДН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. До появления работы И.И. Котова не было определения поверхностей конгруэнтных сечений. Эти и некоторые другие поверхности, образованные движением жесткой кривой, входили в класс кинематических поверхностей. Такие кинематические поверхности, как поверхности плоскопараллельного переноса, поверхности вращения, резные поверхности Монжа, циклические поверхности с образующей окружностью постоянного радиуса, ротативные и спироидальные поверхности, винтовые и часть винтообразных поверхностей, могут быть включены и в класс поверхностей конгруэнтных сечений.

Материалы и методы. Авторы, следуя методике И.И. Котова, впервые получили параметрические и векторные уравнения восьми поверхностей конгруэнтных сечений маятникового типа на круговом, эллиптическом и параболическом цилиндрах, а также нескольких винтообразных поверхностей. За образующие плоские кривые принимаются эллипсы и параболы, которые могут быть расположены в плоскости образующей кривой направляющего цилиндра или в плоскостях пучка, проходящих через продольную ось цилиндра. Эллипсы, рассматриваемые в статье, легко могут быть переведены в окружности, что еще больше расширяет круг возможных рассматриваемых форм.

Результаты. Формулы приведены в обобщенном виде, поэтому форма плоской образующей кривой может быть произвольной. Некоторые поверхности конгруэнтных сечений заданы двумя разновидностями параметрических уравнений. В одном случае за независимый параметр в параметрических уравнениях принимается центральный угол направляющей цилиндрической поверхности, а в другом — одна из прямоугольных координат направляющей кривой цилиндра. Рассматриваются два типа поверхностей: когда местные оси образующих кривых остаются параллельными при движении и когда они поворачиваются.

Выводы. На основе анализа использованной литературы и полученных результатов даны предложения и рекомендации по применению поверхностей конгруэнтных сечений в архитектуре и технике. Приведенная библиография из 27 наименований показывает, что рассматриваемые поверхности находятся в поле зрения архитекторов, инженеров и геометров как в России, так и за рубежом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кинематическая поверхность, поверхность конгруэнтных сечений, винтовая поверхность, дифференциальная геометрия, архитектурная геометрия, архитектура свободных форм, тонкие оболочки, формообразование оболочки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Поверхности конгруэнтных сечений на цилиндрах // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1620–1631. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1620-1631

Surfaces of congruent sections on cylinders

Sergey N. Krivoschapko, Vyacheslav N. Ivanov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The definition of surfaces of congruent sections was first formulated in the work written by I.I. Kotov. These and several other types of surfaces, generated by the motion of a curve, belonged to the class of kinematic surfaces. Such kinematic surfaces as those of plane parallel displacement, surfaces of rotation, Monge surfaces, cyclic surfaces with generating circles having constant radius, rotative and spiroidal surfaces, helical some helix-shaped surfaces can be included into the class of surfaces that have congruent sections.

Materials and methods. Using I.I. Kotov's methodology, the authors first derived parametrical and vector equations for eight surfaces of congruent pendulum type cross sections of circular, elliptic, and parabolic cylinders and several helix-shaped surfaces. Circles, ellipses, and parabolas, located in the plane of the generating curve of a guiding cylinder or in the planes of a bundle that passes through the longitudinal axis of a cylinder, generate plane curves. Ellipses, analyzed in the article, can be easily converted into circles and this procedure can increase the number of shapes analyzed here.

Results. Formulas are provided in the generalized form, so the shape of a plane generating curve can be arbitrary. Some surfaces of congruent sections are determined by two varieties of parametric equations. In one case, the central angle of the guiding cylindrical surface was used as an independent parameter, but in the other case, one of rectangular coordinates of the cylinder's guiding curve served as an independent parameter. Two types of surfaces are analyzed: 1) when local axes of generating curves remain parallel in motion; 2) when these axes rotate.

Conclusions. The analysis of the sources and the results, recommendations and proposals for application of surfaces, having congruent sections, is made with a view to their use in architecture and technology. The list of references has 27 positions, and it shows that the surfaces considered in this paper are being analyzed by architects, engineers, and geometers both in Russia and abroad.

KEYWORDS: kinematic surface, surface of congruent sections, helical surface, differential geometry, architectural geometry, freeform architecture, thin-walled shells, shell formation

FOR CITATION: Krivoschapko S.N., Ivanov V.N. Surfaces of congruent sections on cylinders. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1620-1631. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1620-1631 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностью конгруэнтных сечений называется поверхность, несущая на себе непрерывное однопараметрическое семейство плоских линий. Поверхность получается в результате движения заданной жесткой плоской линии (образующей). Выделение рассматриваемых поверхностей в отдельный класс упростило изложение методов их построения средствами компьютерной графики и начертательной геометрии поверхностей. Впервые это предложил сделать известный ученый, доктор физико-математических наук, профессор И.И. Котов (МАИ, г. Москва) в 1973 г.

До этого поверхности конгруэнтных сечений были разбросаны по разным классам поверхностей. Например, простейшими поверхностями конгруэнтных сечений являются *поверхности плоскопараллельного переноса* относительно плоскости проекций. *Поверхности вращения* также могут быть причислены к классу поверхностей конгруэнтных сечений. *Резные поверхности Монжа* подходят под определение поверхностей конгруэнтных сечений [1]. Все *циклические поверхности* с образующей окружностью постоянного радиуса можно также включать в класс поверхностей конгруэнтных сечений [2]. *Ротативные поверхности* входят в одну из групп поверхностей конгруэнтных сечений. *Обыкновенные винтовые поверхности* образуются винтовым движением какой-либо жесткой линии. Следовательно, они могут быть включены в класс поверхностей конгруэнтных сечений на круговом цилиндре [3].

Предложение по организации класса поверхностей конгруэнтных сечений не подразумевает их исключения из других классов поверхностей. Термин «поверхности конгруэнтных сечений» используется, когда нужно показать более широкую группу поверхностей, а не перечислять все классы поверхностей, куда входят исследуемые поверхности.

Геометрией поверхностей с конгруэнтными кривыми занимались выдающиеся украинские геометры В.Е. Михайленко, В.Т. Шеин (1972), а также D. Brander и J. Gravesen [4], R. Lopez и O. Perdomo [5], В.Н. Иванов [6], С.Н. Кривошапко [7] и др. В указанных работах [3–8] авторы уже использовали понятие поверхностей конгруэнтных сечений.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время существует большое число зарегистрированных компьютерных программ для определения напряженно-деформированного

состояния строительных и машиностроительных объектов [9], имеющих искривленную поверхность. В основном все расчеты ведутся с применением численных методов: МКЭ, ВРМ и др. Срединные поверхности оболочек должны быть заданы аналитически или с помощью числовых отметок системы точек поверхности. Используется система криволинейных координат в линиях кривизны или в ортогональных несопряженных координатах, или система неортогональных криволинейных координат [10–12]. В области расчета строительных и машиностроительных конструкций достигнут большой прогресс. Можно рассчитать практически любую конструкцию на действие любой статической или динамической нагрузки.

Однако архитекторы считают, что в наш век инновационных идей уже недостаточно существующих, хорошо изученных аналитических поверхностей для реализации творческих замыслов архитекторов и инженеров [13, 14]. Архитекторы и инженеры-механики требуют создания и исследования новых форм и поверхностей, описываемых аналитическими уравнениями, для внедрения их в различные отрасли науки и техники, поэтому у авторов появилась идея расширить класс поверхностей конгруэнтных сечений за счет винтовых поверхностей конгруэнтных сечений и поверхностей конгруэнтных сечений маятникового типа на круговом, эллиптическом и параболическом цилиндрах. Эти поверхности, возможно, удовлетворят некоторые потребности архитекторов в новых формах и позволят инженерам-механикам изучать процесс колебательного движения тел рассматриваемых форм в пространстве. Но И.А. Бондаренко [15] предостерегает, «что при этом нельзя скатываться к популизму. Необходимо во всем соблюдать чувство меры. К сожалению, сегодня все успехи и неуспехи архитекторов основаны, главным образом, на их персональных деловых и человеческих качествах. Слишком поощряется индивидуализм и гипертрофированная — «прорывная» — творческая креативность. ... Это приводит к тому, что за профессиональное достижение может выдаваться нечто несостоятельное, за архитектурную новацию — бессмысленное дизайнерское оригинальничание».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения заявленных аналитических поверхностей используются методы аналитической и дифференциальной геометрии. Для визуализации этих поверхностей применяются системы MathCad

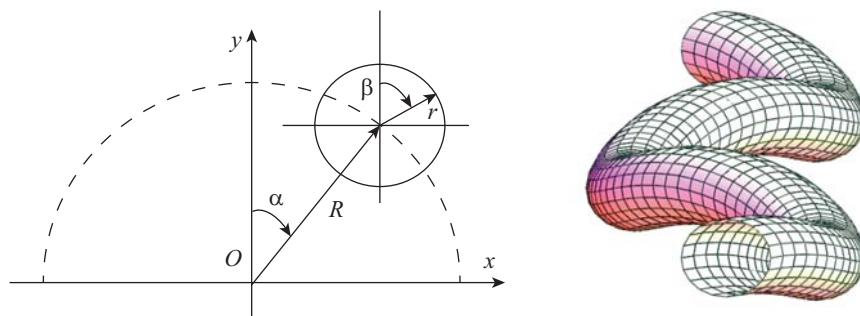


Рис. 1. Циклическая поверхность маятникового типа с плоскостью параллелизма на круговом цилиндре

Fig. 1. A pendulum type cyclic surface with the plane of parallelism on a circular cylinder

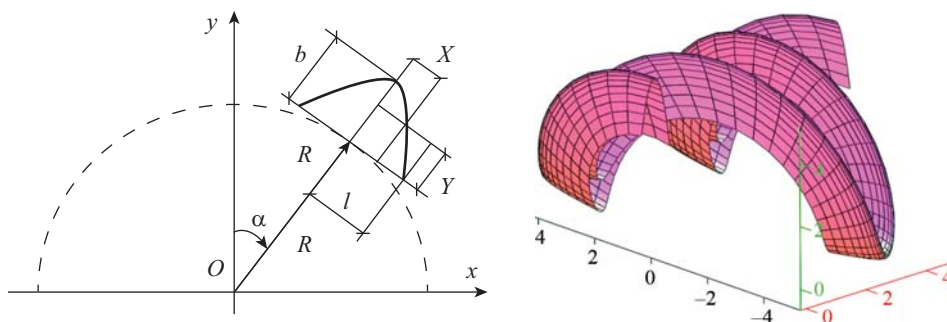


Рис. 2. Поверхность конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на круговом цилиндре, $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$

Fig. 2. A surface with congruent parabolic sections of the pendulum type on a circular cylinder, $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$

и AutoCad. За одно семейство плоских координатных линий рассматриваемых поверхностей принимаются сами жесткие образующие кривые, а другое семейство криволинейных координат — траектории точек конгруэнтных образующих кривых [16, 17].

Поверхности конгруэнтных сечений на круговом цилиндре

Поверхности конгруэнтных сечений маятникового типа на круговом цилиндре

Несколько поверхностей этого типа рассматривались в статьях [7] (рис. 1, 2).

Используя формулы, полученные в работе [8]:

$$\begin{aligned} x &= x(t, X) = (R + Y) \sin \alpha + X \cos \alpha; \\ y &= y(t, X) = (R + Y) \cos \alpha + X \sin \alpha; \\ z &= z(t) = at, \text{ где } \alpha = c + b \sin t \end{aligned} \quad (1)$$

для поверхности маятникового типа на круговом цилиндре радиусом R и с образующей параболой $Y = h - (h/l^2)X^2$, можно получить несколько интересных геометрических образов. Например, на рис. 2 изображена поверхность, для которой $R = 3$ м; $h = 2$ м; $l = 0,5$ м; $-l \leq X \leq l$; $0 \leq t \leq 3\pi$. Угол α изменяется в пределах $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$, следовательно, $c = 0$; $b = \pi/2$. Длина поверхности в направлении оси z равна 6 м, поэтому $z = at = 6$ или $a = 2/\pi$. Аналогичная поверхность, но при $-\pi \leq \alpha \leq \pi$, т.е. при $b = \pi$, $c = 0$ представлена на рис. 3.

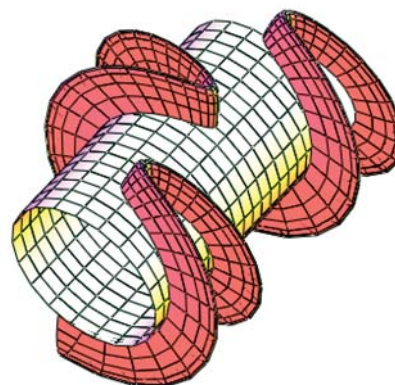


Рис. 3. Поверхность конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на круговом цилиндре, $-\pi \leq \alpha \leq \pi$

Fig. 3. A surface with congruent parabolic sections of the pendulum type on a circular cylinder, $-\pi \leq \alpha \leq \pi$

Винтовые поверхности конгруэнтных сечений на круговом цилиндре

Данные поверхности образуют класс винтовых поверхностей.

Винтовая поверхность образовывается жесткой кривой L при ее винтовом движении. При вин-

товом движении образующая кривая L равномерно вращается вокруг оси вращения и одновременно совершает поступательное перемещение в направлении этой же оси, называемой винтовой осью. Принимая координатную ось Oz за ось вращения и задавая плоскую образующую кривую L уравнением $z = f(r)$, можно записать векторное уравнение винтовой поверхности в виде:

$$\begin{aligned} r &= r(r, \varphi) = r \cos \varphi i + r \sin \varphi j + [f(r) + a\varphi]k = \\ &= re(\varphi) + [f(r) + a\varphi]k \end{aligned}$$

или явное уравнение в форме:

$$z = f\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) + a \arctg(y/x).$$

При $a = 0$ винтовая поверхность становится поверхностью вращения. Винтовые поверхности в отличие от винтообразных полностью входят в класс поверхностей конгруэнтных сечений. Винтовые поверхности состоят из двух подклассов: 1) обыкновенные винтовые поверхности, которые включают в себя линейчатые винтовые поверхности [18], круговые винтовые поверхности и винтовые поверхности с произвольными плоскими образующими кривыми; 2) винтовые поверхности переменного шага. Винтовые поверхности изучены довольно хорошо благодаря их широкому применению на практике [19, 20]. Наиболее полная информация о них приведена в энциклопедии [21]. На рис. 4 показана винтовая поверхность с образующим эллипсом, центр которого лежит на круговой цилиндрической поверхности радиусом a .

В энциклопедии [21] приведена параметрическая форма задания поверхности, изображенная на рис. 4:

$$\begin{aligned} x &= x(u, v) = (a + c \cos v \cos \theta + d \sin v \sin \theta) \cos u; \\ y &= y(u, v) = (a + c \cos v \cos \theta + d \sin v \sin \theta) \sin u; \\ z &= z(u, v) = bu - c \cos v \sin \theta + d \sin v \cos \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

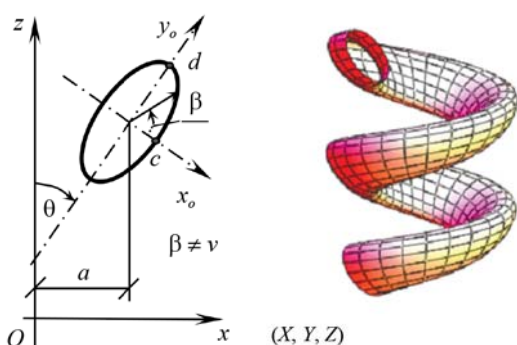


Рис. 4. Винтовая поверхность с образующим эллипсом

Fig. 4. A helical surface with a generating ellipse

При построении этой поверхности принято $d > c$, $a \neq 0$, $b \neq 0$, $\theta = \pi/4$. Изменяя геометрические

параметры d, c, b, a , можно получить разнообразные формы поверхностей, задаваемые одними и теми же уравнениями (2).

Поверхности конгруэнтных сечений на эллиптическом цилиндре

Поверхности конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптическом цилиндре

Предположим, что парабола

$$Y = h - \frac{hX^2}{l^2}, \quad (3)$$

с осью, параллельной оси Oy , перемещается в плоскости xOy по неподвижному эллипсу

$$y_s^2/p^2 + x_s^2/d^2 = 1,$$

т.е., согласно рис. 5,

$$R = R(\alpha) = pd / [p^2 \sin^2 \alpha + d^2 \cos^2 \alpha]^{1/2} \quad (4)$$

и одновременно перемещается вдоль оси z (рис. 5). Образованную таким образом поверхность с плоскостью параллелизма xOy можно назвать *прямой поверхностью с параболическими конгруэнтными сечениями маятникового типа на эллиптическом цилиндре* (рис. 6, а, b). Параметрические уравнения этой поверхности с плоскостью параллелизма xOy на эллиптическом цилиндре могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} x &= x(t, X) = R \sin \alpha + X = R \sin(c + b \sin t) + X; \\ y &= y(t, X) = R \cos \alpha + Y = R \cos(c + b \sin t) + Y; \\ z &= z(t) = at, \end{aligned} \quad (5)$$

где $R = R(\alpha)$ определяется по формуле (4), угол α показан на рис. 5. Угол α представляется в виде [7]:

$$\alpha = c + b \sin t, \quad (6)$$

где параметр b — амплитуда изменения угла α ; c — параметр, характеризующий начальное значение угла α при $z = 0$; a — константа, определяющая длину циклический поверхности в направлении оси z , координата Y определяется по формуле (3).

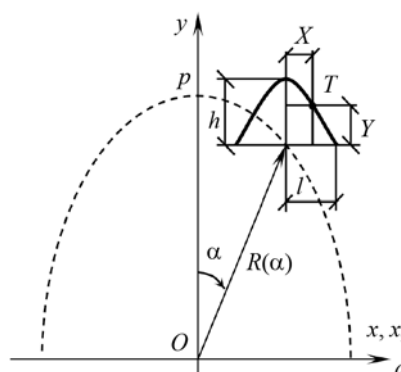


Рис. 5. Схема построения поверхности конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптическом цилиндре

Fig. 5. Pendulum type surface generation pattern with congruent parabolic sections of an elliptic cylinder

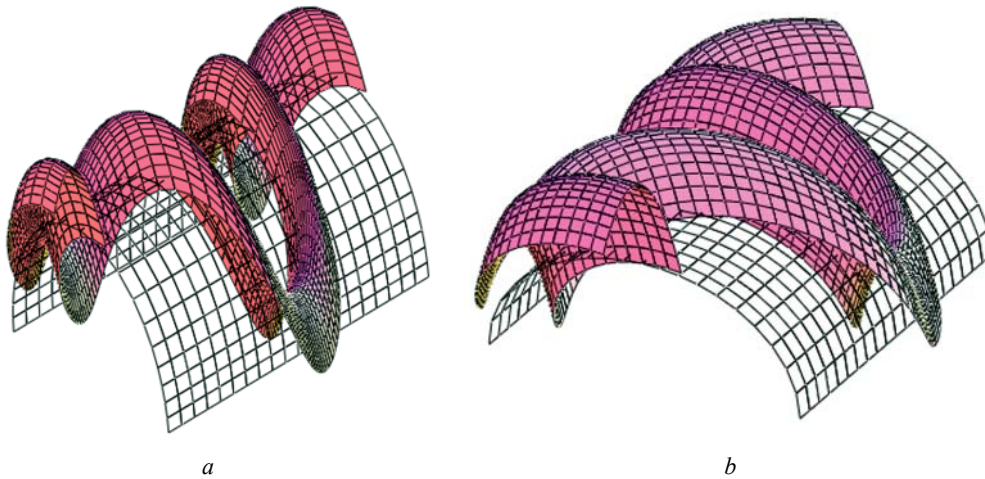


Рис. 6. Поверхности конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптических цилиндрах с $p > d$ (a) и $p < d$ (b)

Fig. 6. Surfaces of congruent parabolic sections of the pendulum type on elliptic cylinders, if $p > d$ (a) and when $p < d$ (b)

Пусть угол α изменяется в пределах $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$, следовательно, $c = 0$; $b = \pi/2$. Примем длину поверхности в направлении оси z равной 9 м, поэтому $z = at = a3\pi = 9$ м или $a = 3/\pi$, м. Для первого примера возьмем эллиптический цилиндр с $p = 4$ м, $d = 3$ м, а $l = 1$ м, $h = 2$ м (рис. 6, a). Для второго примера — эллиптический цилиндр с $p = 3$ м, $d = 4$ м, $l = 1$ м, $h = 2$ м (рис. 6, b).

Прямую поверхность с параболическими конгруэнтными сечениями маятникового типа на эллиптическом цилиндре (рис. 5) можно задать другими параметрическими уравнениями:

$$\begin{aligned} x &= x(x_3, X) = x_3 + X, x = x(x_3, X) \\ y &= y(x_3, X) = p \left[1 - x_3^2/d^2 \right]^{1/2} - hX^2/l^2; \quad (7) \\ z &= z(x_3) = (m/\pi) \arcsin(x_3/k), \end{aligned}$$

где x_3 , p , d , h , l , X показаны на рис. 5; $-l \leq X \leq l$, $-k \leq x_3 \leq k$, $k = \text{const}$ — принятое значение амплитуды колебания параболы, т.е. $k \leq d$; m — длина полу волны синусоиды; n — число полу волн синусоиды, образованной точкой O_1 ;

$$x_3 = k \sin(\pi z / m), \quad (8)$$

откуда $z(x_3) = (m/\pi) \arcsin(x_3/k)$.

В параметрических уравнениях (7) используются независимые переменные x_3 и X . В третьем уравнении (7) появляется обратная тригонометрическая функция $\arcsin(x_3/k)$, что вызывает определенные неудобства при вычислении.

Примем в качестве независимых переменных параметров z и X , тогда параметрические уравнения (7) с учетом формулы (8) примут вид:

$$\begin{aligned} x &= x(z, X) = x_3 + X = k \sin(\pi z / m) + X; \\ y &= y(z, X) = p \left\{ 1 - [k \sin(\pi z / m)]^2 / d^2 \right\}^{1/2} + h - hX^2/l^2; \quad (9) \\ z &= z(z) = z. \end{aligned}$$

При построении поверхности, изображенной на рис. 7, использовались параметрические уравнения (9) с

$$\begin{aligned} p &= 3 \text{ м}, d = 4 \text{ м}, l = 1 \text{ м}, h = 2 \text{ м}, \\ -l &\leq X \leq l, -k \leq x_3 \leq k, \\ k &= d; m = 3 \text{ м}, n = 3, \text{ т.е. } 0 \leq z \leq 8 \text{ м}. \end{aligned}$$

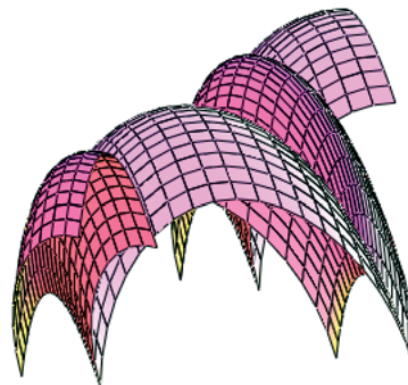


Рис. 7. Поверхность конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптическом цилиндре с $p = 3$ м, $d = 4$ м

Fig. 7. The pendulum type surface of congruent parabolic sections on an elliptic cylinder, if $p = 3$ м, $d = 4$ м

Если принять $p = d$, то получим прямую поверхность с параболическими конгруэнтными сечениями маятникового типа на круговом цилиндре.

Пусть требуется построить поверхность с параболическими конгруэнтными сечениями маятникового типа на эллиптическом цилиндре, при условии, что ось Y параболы

$$Y = h - (h/l^2) X^2 \quad (10)$$

все время проходит через центр O эллипса (рис. 8)

$$y_3^2/p^2 + x_3^2/d^2 = 1.$$

Используя формулу (4), находим:

$$\begin{aligned} x &= x(t, X) = (R + Y) \sin \alpha + X \cos \alpha; \\ y &= y(t, X) = (R + Y) \cos \alpha - X \sin \alpha; \\ z &= z(t) = at, \text{ где } a = c + b \sin t. \end{aligned} \quad (11)$$

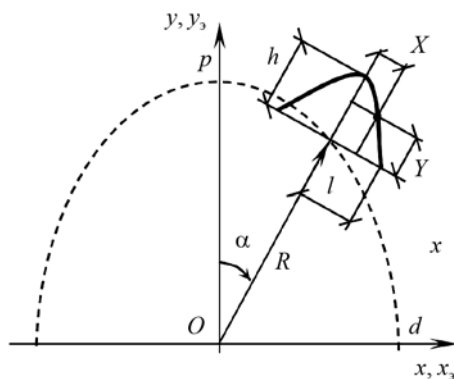


Рис. 8. Схема построения поверхности конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптическом цилиндре при условии, что ось параболы все время проходит через центр эллипса

Fig. 8. Generation of the surface having pendulum type congruent parabolic sections on an elliptic cylinder, if the parabola axis continuously crosses the ellipse centre

Чтобы получить поверхность маятникового типа на круговом цилиндре радиусом R (рис. 2) и с образующей параболой (10), необходимо принять

$$p = d = R.$$

Параметрические уравнения (11) дают возможность построить несколько интересных геометри-

ческих образов. Например, на рис. 9, а изображена поверхность, для которой

$$p = 4 \text{ м}; d = 3 \text{ м}; h = 2 \text{ м}; l = 1,5 \text{ м}; -l \leq X \leq l; 0 \leq t \leq 3\pi.$$

Угол α изменяется в пределах $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$, следовательно,

$$c = 0; b = \pi/2.$$

Длина поверхности в направлении оси z равна 6 м, поэтому

$$z = at = a3\pi = 6 \text{ м или } a = 2/\pi.$$

Аналогичная поверхность, но при $-\pi \leq \alpha \leq \pi$, т.е. при $b = \pi, c = 0$ представлена на рис. 9, б.

Винтообразные поверхности конгруэнтных сечений на эллиптическом цилиндре

Винтообразные поверхности строятся образующими кривыми, которые, помимо простого винтового движения относительно винтовой оси, совершают какое-либо дополнительное движение или деформируются по определенному закону. При этом траектории точек образующей кривой при винтообразном движении не будут цилиндрическими винтовыми линиями. Винтообразные поверхности жестких конгруэнтных сечений на эллиптическом цилиндре можно отнести как к классу винтообразных поверхностей, так и к классу поверхностей конгруэнтных сечений. Рассматриваемые винтообразные поверхности при равенстве полуосей эллипса будут вырождаться в винтовые поверхности.

В качестве образующих жестких кривых, формирующих поверхности конгруэнтных сечений на эллиптическом цилиндре, можно брать любую плоскую кривую, что позволит получить большое разнообразие изучаемых поверхностей. Для примеров рассмотрим только квадратные параболы и эллипсы, выбранные точки которых движутся по винтообразным линиям

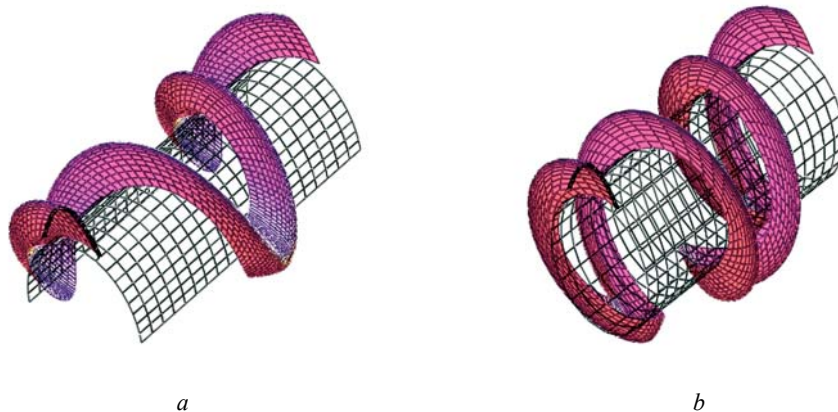


Рис. 9. Поверхности конгруэнтных параболических сечений маятникового типа на эллиптическом цилиндре, $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$ (а) и $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ (б)

Fig. 9. Surfaces having congruent parabolic sections of the pendulum type on an elliptic cylinder, $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$ (a) and $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ (b)

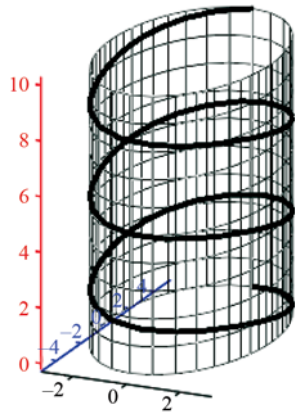


Рис. 10. Винтообразная кривая (12) на эллиптическом цилиндре (13)

Fig. 10. A helix-shaped curve (12) on an elliptic cylinder (13)

$$x = R_c \cos \alpha, \quad y = R_c \sin \alpha, \quad z = p\alpha \quad (12)$$

на поверхности эллиптического цилиндра (рис. 10) с

$$R_c = R_c(\alpha) = ab / \left[a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha \right]^{1/2}, \quad (13)$$

где R_c — расстояние от центра эллипса до произвольной точки на эллипсе; α — угол, отсчитываемый от оси Ox до линии длиной R_c ; a и b — длины полуосей эллипса; p — параметр, характеризующий шаг винтообразной линии (12).

Пусть образующий подвижный эллипс с

$$R_o = R_o(\beta) = cd / \left[c^2 \sin^2 \alpha + d^2 \cos^2 \alpha \right]^{1/2} \quad (14)$$

лежит в плоскости, параллельной координатной плоскости xOz , тогда параметрические уравнения винтообразной поверхности конгруэнтных эллиптических сечений на эллиптическом цилиндре (рис. 11) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} x &= R_c(\alpha) \cos \alpha + R_o(\beta) \cos \beta; \quad y = R_c(\alpha) \sin \alpha; \\ z &= p\alpha + R_o(\beta) \sin \beta, \end{aligned} \quad (15)$$

где $p = L/(2k\pi)$; L — длина цилиндра; k — число витков.

Если ввести обозначения

$$\mathbf{h}(\alpha) = \mathbf{i} \cos \alpha + \mathbf{j} \sin \alpha, \quad \mathbf{e}(\beta) = \mathbf{i} \cos \beta + \mathbf{k} \sin \beta, \quad (16)$$

то рассматриваемую поверхность (15) можно задать векторным уравнением:

$$\mathbf{p}(\alpha, \beta) = R_c(\alpha) \mathbf{h}(\alpha) + p\alpha \mathbf{k} + R_o(\beta) \mathbf{e}(\beta).$$

Винтообразную поверхность эллиптических конгруэнтных сечений на эллиптическом цилиндре (13) с образующими эллипсами (14) в плоскостях пучка, проходящих через координатную ось Oz эллиптического цилиндра, можно задать векторным уравнением (рис. 12):

$$\mathbf{p}(\alpha, \beta) = R_c(\alpha) \mathbf{h}(\alpha) + p\alpha \mathbf{k} + R_o(\beta) \mathbf{g}(\alpha, \beta),$$

где вектор $\mathbf{h}(\alpha)$ задан в виде (16), $\mathbf{g}(\alpha, \beta) = \mathbf{h}(\alpha) \cos \beta + \mathbf{k} \sin \beta$. При построении поверхности, показанной

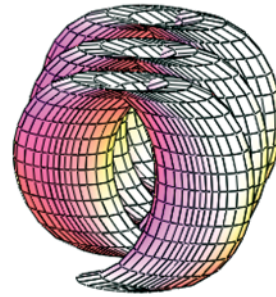


Рис. 11. Винтообразная поверхность конгруэнтных эллиптических сечений с плоскостью параллелизма на эллиптическом цилиндре

Fig. 11. A helix-shaped surface of congruent elliptic sections with the plane of parallelism on an elliptic cylinder

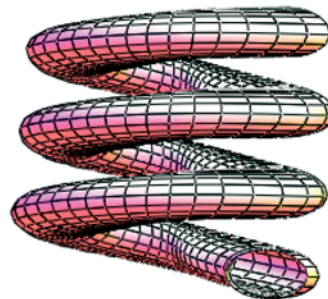


Рис. 12. Винтообразная поверхность конгруэнтных эллиптических сечений (14) в плоскостях пучка на эллиптическом цилиндре (13)

Fig. 12. A helix-shaped surface of congruent elliptic sections (14) in the planes of a bundle on an elliptic cylinder (13)

на рис. 12, принято: $a = 5$ м, $b = 3$ м, $c = 2$ м, $d = 1$ м, $L = 10$ м, $k = 3$, $0 \leq \beta \leq 2\pi$.

Винтообразная поверхность параболических конгруэнтных сечений с осью, параллельной вертикальной оси Oz в плоскостях пучка, проходящих через ось Oz , на эллиптическом цилиндре (13), может привлечь внимание инженеров в качестве желоба для спуска сыпучих или жидких грузов. Ее можно задать векторным уравнением:

$$\mathbf{p}(\alpha, \beta) = [R_c(\alpha) + \beta] \mathbf{h}(\alpha) + [p\alpha + d\beta^2/c^2] \mathbf{k}, \quad (17)$$

где вектор $\mathbf{h}(\alpha)$ задается одной из формул (16), величина $R_c(\alpha)$ приведена в виде (13). При построении поверхности принято: $a = 5$ м, $b = 3$ м, $c = 2$ м, $d = 1$ м (рис. 13). Если принять $a = b$, то эллиптический цилиндр вырождается в круговой цилиндр, а проектируемая поверхность станет винтовой поверхностью с параболической образующей.

Если необходимо, чтобы по поверхности эллиптического цилиндра (13) вдоль винтообразной кривой (12) парабола скользила своей вершиной, т.е. лежала в плоскостях, параллельных координатной

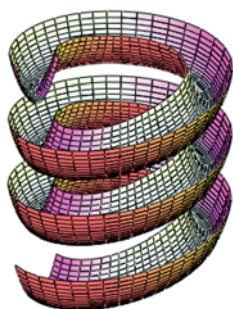


Рис. 13. Винтообразная поверхность параболических конгруэнтных сечений с осью, параллельной вертикальной оси Oz в плоскостях пучка, проходящих через ось Oz , на эллиптическом цилиндре (13)

Fig. 13. A helix-shaped surface of congruent parabolic sections with an axis parallel to vertical axis Oz in the planes of a bundle passing through axis Oz on an elliptic cylinder (13)

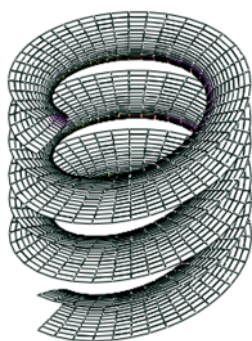


Рис. 14. Разновидность винтообразной поверхности параболических конгруэнтных сечений с осями, параллельными координатной плоскости xOy

Fig. 14. A type of a helix-shaped surface of congruent parabolic sections having axes that are parallel to coordinate plane xOy

плоскости xOy , и все параболы лежали в плоскостях пучка, проходящих через ось Oz , то векторное уравнение поверхности, образованной траекторией движения параболы (рис. 14), необходимо представить в виде:

$$\rho(\alpha, \beta) = [R_c(\alpha) + d\beta^2/c^2]h(\alpha) + [pa + d\beta^2/c^2]k. \quad (18)$$

Все геометрические параметры, входящие в формулу (18), объяснены в комментариях к формуле (17).

Дополнительные примеры поверхностей конгруэнтных сечений в плоскостях пучка приведены в работе [17].

Поверхности параболических конгруэнтных сечений маятникового типа на параболическом цилиндре

Пусть в сечении параболического цилиндра лежит квадратная парабола (рис. 15, а):

$$y_p = H - Hx_p^2/L^2, \quad (19)$$

по которой совершает колебательное движение с одновременным перемещением вдоль оси цилиндра Oz другая парабола

$$Y = h - hX^2/l^2, \quad (20)$$

ось Y которой все время остается параллельной оси Oy . Тогда один из вариантов параметрических уравнений проектируемой поверхности по аналогии с формулами (8), (9) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} x &= x(z, X) = x_p + X = k \sin(\pi z / m) + X; \\ y &= y(z, X) = \\ &= H - H[k \sin(\pi z / m)]^2 / L^2 + h - hX^2 / l^2; \quad (21) \\ z &= z(z) = z, \end{aligned}$$

где x_p , H , L , h , l , X показаны на рис. 15, а; $-l \leq X \leq l$, $-k \leq x_p \leq k$, k — принятое значение проекции амплитуды колебания параболы на плоскость xOz , т.е. $k \leq L$; m — длина полуволны синусоиды; n — число полуволн синусоиды, образованной точкой пересечения осей O_1X и O_1Y образующей параболы; $m \times n$ — длина проектируемой поверхности в направлении оси Oz .

На рис. 15, б показана траектория движения точки O_1 (начало координат) по параболическому цилиндру.

При построении поверхности, изображенной на рис. 15, с, использовались параметрические уравнения (21) с $H = 3$ м, $L = 2$ м, $l = 1$ м, $h = 1$ м, $-l \leq X \leq l$, $-k \leq x_p \leq k$, $k = L$, $m = 3$ м, $n = 3$, т.е. $0 \leq z \leq 9$ м.

Методика построения поверхности (рис. 15) показывает, что здесь изображена поверхность параболических конгруэнтных сечений маятникового типа на параболическом цилиндре с плоскостью параллелизма xOy .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье за одно семейство плоских координатных линий поверхностей конгруэнтных сечений принимаются сами конгруэнтные образующие кривые, а за другое семейство — траектории точек конгруэнтных кривых.

Впервые получены параметрические и векторные уравнения восьми рассматриваемых поверхностей, которые могут найти применение в технике и в архитектуре свободных форм. Впервые введен в рассмотрение новый подкласс поверхностей конгруэнтных сечений маятникового типа на цилиндрах.

Большинство формул поверхностей представлены в обобщенном виде, что дает возможность расширить виды возможных цилиндрических направляющих поверхностей и типы плоских конгруэнтных кривых. Некоторые поверхности заданы двумя разновидностями параметрических уравнений или в векторной форме. В одном случае за независимый параметр в параметрических уравнении

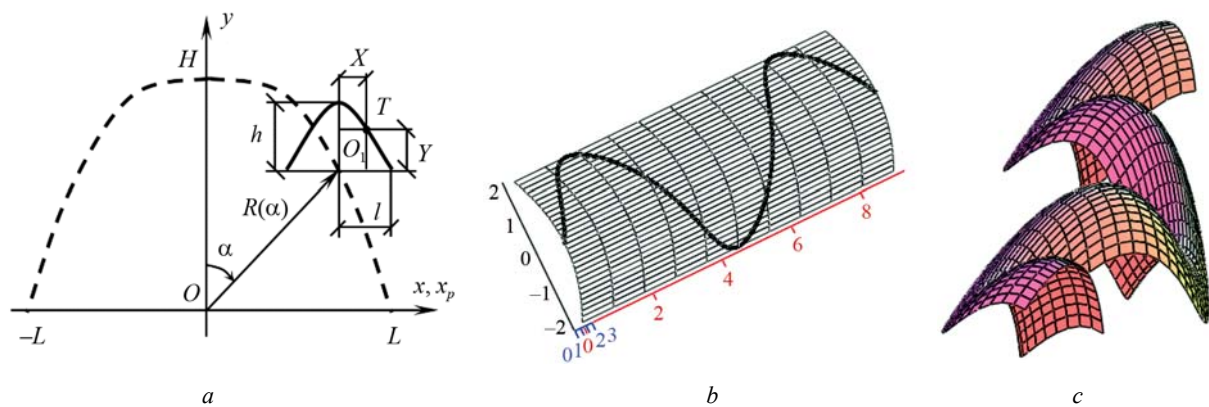


Рис. 15. Схема построения поверхности параболеских конгруэнтных сечений маятникового типа на параболическом цилиндре (a); траектория движения точки пересечения координатных осей образующей параболы (b); поверхность параболеских конгруэнтных сечений маятникового типа на параболическом цилиндре (c)

Fig. 15. Generation of a pendulum type surface with congruent parabolic sections on a parabolic cylinder (a); the motion trajectory of the point of intersection of the coordinate axes of the generating parabola (b); a pendulum type surface with congruent parabolic sections on a parabolic cylinder (c)

ях принимается центральный угол направляющей цилиндрической поверхности, а в другом — одна из координат направляющей кривой цилиндра.

Все полученные уравнения новых поверхностей конгруэнтных сечений на цилиндрах проверены на конкретных числовых примерах. Все поверхности в статье построены с помощью компьютерного комплекса MathCad и AutoCad на основе «Банка поверхностей и кривых», созданного в Инженерной академии Российского университета дружбы народов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложения и рекомендации по применению поверхностей конгруэнтных сечений

Как указывалось ранее во введении, выделение поверхностей конгруэнтных сечений в отдельный класс помогло упростить изложение методов конструирования поверхностей с плоской жесткой образующей кривой [1, 22]. Представленные поверхности могут быть интересны архитекторам или могут найти применение в машиностроительных тонкостенных конструкциях, или при изучении траекторий движения тел при их колебательно-поступательном движении.

Некоторые архитекторы предлагают использовать эти поверхности в архитектуре свободных форм. Способ формирования поверхностей конгруэнтных сечений (профилей) позволяет активно применять методы компьютерного моделирования при создании и варианном выборе соответствующих форм конструкций и сооружений [22].

В статье [23] также поддерживается идея использования поверхностей конгруэнтных сечений в архитектуре свободных форм. Иногда их применение вызывается необходимостью решения структурных

и геометрических задач. Иногда на окончательный выбор влияет меньшая стоимость проекта. Но в основном сооружения в форме поверхностей конгруэнтных сечений остаются в виде концепт-проектов [23].

Архитектура свободных форм содержит много проблем геометрического характера, которые необходимо решать, их решение создаст новые возможности для оптимизации архитектурных проектов на практике [24]. В решении некоторых геометрических задач могут помочь поверхности конгруэнтных сечений.

Несколько поверхностей конгруэнтных сечений (рис. 16, a) легко состыковать между собой и получить новую инновационную форму конструкции (рис. 16, b) [25]. Если состыковать две поверхности, показанные на рис. 11, то можно создать новый объект для архитектуры сводных форм.

В качестве подвижных образующих жестких плоских кривых в основном используют кривые второго порядка [6–8, 25], но в ряде случаев необходимость требует применения более сложных кривых [22, 23, 26]. Выбору конгруэнтных кривых могут помочь параллельные исследования геометров [27].

ВЫВОДЫ

В энциклопедии [21] показано, что на настоящее время в разной степени изучены и предложены к использованию более 600 аналитических поверхностей, которые группируются в 38 классов. За последнее десятилетие появились новые аналитические поверхности, которые не включены в энциклопедию, но исследователи этих поверхностей уверены, что они будут нужны инженерам и архитекторам. В этом уверены и авторы, предлагая к рассмотрению новые формы поверхностей конгруэнтных плоских сечений, перемещающихся

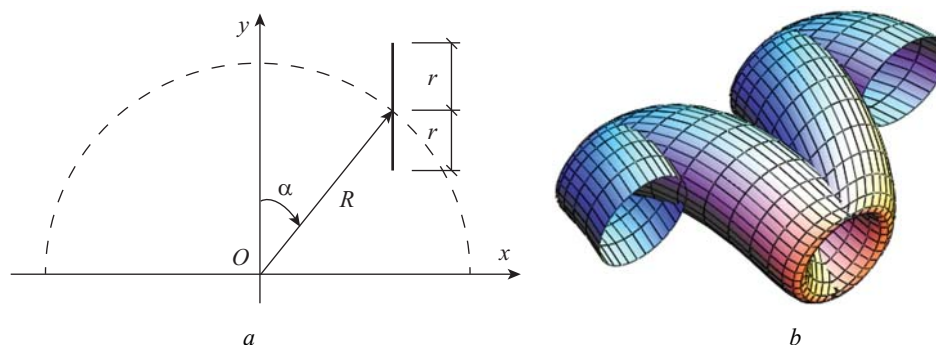


Рис. 16. Циклическая поверхность конгруэнтных сечений маятникового типа: схема ее построения (a) и компьютерная модель (b)

Fig. 16. The cyclic surface of the pendulum type congruent sections: the generation pattern (a) and the virtual model (b)

по заданному круговому, эллиптическому и параболическому цилиндру вдоль направляющих синусоидальных, винтовых и винтообразных кривых, лежащих на этих цилиндрах. За жесткие образующие кривые приняты окружности, эллипсы и параболы. Авторы с учетом результатов, приведенных в их

предыдущих опубликованных работах, ввели в обращение около двух десятков новых поверхностей конгруэнтных сечений на цилиндрах. В дальнейшем может возникнуть необходимость в использовании других конгруэнтных кривых, что легко реализовать, используя материалы данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Filipova J., Rynkovskaya M. Carved Monge surfaces as new forms in the architecture // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 95. P. 17006. DOI: 10.1051/mateconf/20179517006
2. Hyeng C.A.B., Yamb E.B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics // International Journal of Modern Engineering Research. 2012. Vol. 2. Issue 3. Pp. 799–806.
3. Savičević S., Ivandić Z., Jovanović J., Grubiša L., Stoić A., Vukčević M. et al. Experimental research on machine elements of helicoidal shell shape // Tehnicki vjesnik. 2017. Vol. 24. Issue 1. Pp. 167–175. DOI: 10.17559/TV-20150816201404
4. Brander D., Gravesen J. Monge surfaces and planar geodesic foliations // Journal of Geometry. 2018. Vol. 109. Issue 1. DOI: 10.1007/s00022-018-0413-7
5. Lopez R., Perdomo O. Minimal translation surfaces in Euclidean space // The Journal of Geometric Analysis. 2017. Vol. 27. Issue 4. Pp. 2926–2937. DOI: 10.1007/s12220-017-9788-1
6. Иванов В.Н. Геометрия циклических оболочек переноса с образующей окружностью и направляющими меридианами базовой сферы // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 2. С. 3–8.
7. Кривошапко С.Н., Шамбина С.Л. К вопросу о поверхностях конгруэнтных сечений маятникового типа на круговом цилиндре // Прикладна геометрія та інженерна графіка. К. : КНУБА, 2011. Вып. 88. С. 196–200.
8. Pei D., Takahashi M., Yu H. Envelopes of one-parameter families of framed curves in the Euclidean space // Journal of Geometry. 2019. Vol. 110. Issue 3. DOI: 10.1007/s00022-019-0503-1
9. Rynkovskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 45–53. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53
10. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. М. : ГТТИ, 1953. 544 с.
11. Григоренко Я.М., Тимонин А.М. Об одном подходе к численному решению краевых задач теории оболочек сложной геометрии в неортогональных криволинейных системах координат // Доклады Академии наук Украинской ССР. 1991. № 4. Вып. 9. С. 41–44.
12. Cheng Y.P., Lee T.S., Low H.T., Tao W.Q. An efficient and robust numerical scheme for the SIMPLER algorithm on non-orthogonal curvilinear coordinates: CLEARER // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 2007. Vol. 51. Issue 5. Pp. 433–461. DOI: 10.1080/10407790601009115
13. Čučaković A., Jović B., Komnenov M. Biometric geometry approach to generative design // Periodica Polytechnica Architecture. 2016. Vol. 47. Issue 2. Pp. 70–74. DOI: 10.3311/PPar.10082
14. Prabhakaran R.T.D., Spear M.J., Curling S., Wootton-Beard P., Jones P., Donnison I. et al. Plants and architecture: the role of biology and biomimetics in materials development for buildings // Intelligent Buildings

International. 2019. Vol. 11. Issue 3–4. Pp. 178–211. DOI: 10.1080/17508975.2019.1669134

15. Бондаренко И.А. Об уместности и умеренности архитектурных новаций // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 13–18.

16. Knott G., Viquerat A. Helical bistable composite slit tubes // Composite Structures. 2019. Vol. 207. Pp. 711–726. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.045

17. Simenko E.V., Voronina M.V. Constructive methods of forming surfaces // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 6. Pp. 956–962.

18. Krivoshapko S.N., Rynkovskaya M. Five types of ruled helical surfaces for helical conveyers, support anchors and screws // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 95. P. 06002. DOI: 10.1051/mateconf/20179506002

19. Bonafoni G., Capata R. Proposed design procedure of a helical coil heat exchanger for an Orc energy recovery system for vehicular application // Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, Magnolithe. 2015.

20. Sokolova L.N.S., Infante D.L.R., Ermakova E. Helical surfaces and their application in engineering design // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29. Issue 2. Pp. 1839–1846.

21. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of analytical surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 752 p. DOI: 10.1007/978-3-319-11773-7

22. Bartoň M., Pottmann H., Wallner J. Detection and reconstruction of freeform sweeps // Computer Graphics Forum. 2014. Vol. 33. Issue 2. Pp. 23–32. DOI: 10.1111/cgf.12287

23. Mesnil R., Douthe C., Baverel O., L'eger B., Caron J.-F. Isogonal moulding surfaces: A family of shapes for high node congruence in free-form structures // Automation in Construction. 2015. Vol. 59. Pp. 38–47. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.009

24. Pottmann H., Eigensatz M., Vaxman A., Wallner J. Architectural geometry // Computers & Graphics. 2015. Vol. 47. Pp. 145–164. DOI: 10.1016/j.cag.2014.11.002

25. Mesnil R., Santerre Y., Douthe C., Baverel O., Leger B. Generating high node congruence in free-form structures with Monge's surfaces // Conference of the International Association for Shells and Spatial Structures (IASS), 2015. 2015.

26. Abd-Ellah H.N., Abd-Rabo M.A. Kinematic surface generated by an equiform motion of astroid curve // International Journal of Engineering Research and Science. 2017. Vol. 3. Issue 7. Pp. 100–114. DOI: 10.25125/engineering-journal-IJOER-JUL-2017-13

27. Glaeser G., Calvache P. On two special classes of surfaces defined by one or more planar or spatial curves // 15th International Conference on Geometry and Graphics (ISGG 2012). 2012, 1–5 August, Montreal, Canada. 2013. Pp. 220–229.

Поступила в редакцию 12 октября 2020 г.

Принята в доработанном виде 4 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Николаевич Кривошапко — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант Инженерной академии; Российский университет дружбы народов (РУДН); 117198, г. Москва, ГСП-8, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; РИНЦ ID: 122866, ResearcherID: D-8406-2016, Scopus: 6507572305, ORCID: 0000-0002-9385-3699; krivoshapko-sn@rudn.ru;

Вячеслав Николаевич Иванов — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант Инженерной академии; Российский университет дружбы народов (РУДН); 117198, г. Москва, ГСП-8, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; SPIN-код: 3110-9909; i.v.ivn@mail.ru.

REFERENCES

1. Filipova J., Rynkovskaya M. Carved Monge Surfaces as New Forms in the Architecture. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 95:17006. DOI: 10.1051/mateconf/20179517006

2. Hyeng C.A.B., Yamb E.B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012; 2(3):799-806.

3. Savićević S., Ivandić Z., Jovanović J., Grubiša L., Stoić A., Vukčević M. et al. Experimental research on machine elements of helicoidal shell shape.

Tehnicki vjesnik. 2017; 24(1):167-175. DOI: 10.17559/TV-20150816201404

4. Brander D., Gravesen J. Monge surfaces and planar geodesic foliations. *Journal of Geometry*. 2018; 109(1). DOI: 10.1007/s00022-018-0413-7

5. Lopez R., Perdomo O. Minimal translation surfaces in Euclidean space. *The Journal of Geometric Analysis*. 2017; 27(4):2926-2937. DOI: 10.1007/s12220-017-9788-1

6. Ivanov V.N. Geometry of the cyclic translation surfaces with generating circle and directrix meridians

of the base sphere. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2011; 2:3-8. (rus.).

7. Krivoschapko S.N., Shambina S.L. On surfaces of congruent curves of the pendulum type on a round cylinder. *Applied Geometry and Engineering Graphics*. Kiev, KNUBA, 2011; 88:196-200. (rus.).

8. Pei D., Takahashi M., Yu H. Envelopes of one-parameter families of framed curves in the Euclidean space. *Journal of Geometry*. 2019; 110(3). DOI: 10.1007/s00022-019-0503-1

9. Rynkovskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(1):45-53. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53

10. Goldenveizer A.L. *Theory of elastic thin shells*. Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1953; 544. (rus.).

11. Grigorenko Ya.M., Timonin A.M. On one approach to the numerical solution of boundary problems on theory of complex geometry shells in the non-orthogonal curvilinear coordinate systems. *Reports of AS of Ukraine USSR*. 1991; 4(9):41-44. (rus.).

12. Cheng Y.P., Lee T.S., Low H.T., Tao W.Q. An efficient and robust numerical scheme for the SIMPLER algorithm on non-orthogonal curvilinear coordinates: CLEARER. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 2007; 51(5):433-461. DOI: 10.1080/10407790601009115

13. Čučaković A., Jović B., Komnenov M. Biomimetic geometry approach to generative design. *Periodica Polytechnica Architecture*. 2016; 47(2):70-74. DOI: 10.3311/PPar.10082

14. Prabhakaran R.T.D., Spear M.J., Curling S., Wootton-Beard P., Jones P., Donnison I. et al. Plants and architecture: the role of biology and biomimetics in materials development for buildings. *Intelligent Buildings International*. 2019; 11(3-4):178-211. DOI: 10.1080/17508975.2019.1669134

15. Bondarenko I.A. On the appropriateness and moderation of architectural innovation. *Academia. Architecture and Construction*. 2020; 1:13-18. (rus.).

16. Knott G., Viquerat A. Helical bistable composite slit tubes. *Composite Structures*. 2019; 207:711-726. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.045

17. Simenko E.V., Voronina M.V. Constructive methods of forming surfaces. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017; 12(6):956-962.

18. Krivoschapko S.N., Rynkovskaya M. Five types of ruled helical surfaces for helical conveyers, support anchors and screws. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 95:06002. DOI: 10.1051/mateconf/20179506002

19. Bonafoni G., Capata R. Proposed design procedure of a helical coil heat exchanger for an ore energy recovery system for vehicular application. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, Magnoliithe*. 2015.

20. Sokolova L.N.S., Infante D.L.R., Ermakova E. Helical surfaces and their application in engineering design. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(2):1839-1846.

21. Krivoschapko S.N., Ivanov V.N. *Encyclopedia of Analytical Surfaces*. Springer International Publishing Switzerland, 2015; 752. DOI: 10.1007/978-3-319-11773-7

22. Bartoň M., Pottmann H., Wallner J. Detection and reconstruction of freeform sweeps. *Computer Graphics Forum*. 2014; 33(2):23-32. DOI: 10.1111/cgf.12287

23. Mesnil R., Douthe C., Baverel O., L'eger B., Caron J.-F. Isogonal moulding surfaces: A family of shapes for high node congruence in free-form structures. *Automation in Construction*. 2015; 59:38-47. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.009

24. Pottmann H., Eigensatz M., Vaxman A., Wallner J. Architectural Geometry. *Computers & Graphics*. 2015; 47:145-164. DOI: 10.1016/j.cag.2014.11.002

25. Mesnil R., Santerre Y., Douthe C., Baverel O., Leger B. Generating high node congruence in freeform structures with Monge's surfaces. *Conference of the International Association for Shells and Spatial Structures (IASS), 2015*. 2015.

26. Abd-Ellah H.N., Abd-Rabo M.A. Kinematic surface generated by an equiform motion of astroid curve. *International Journal of Engineering Research and Science*. 2017; 3(7):100-114. DOI: 10.25125/engineering-journal-IJOER-JUL-2017-13

27. Georg G., Peter C. On two special classes of surfaces defined by one or more planar or spatial curves. *15th International Conference on Geometry and Graphics (ISGG 2012)*. 2012, 1–5 August, Montreal, Canada. 2013; 220-229.

Received October 12, 2020.

Adopted in revised form on December 4, 2020.

Approved for publication on December 7, 2020.

B I O N O T E S: **Sergey N. Krivoschapko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Consultant Professor of the Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ID RISC: 122866, ResearcherID: D-8406-2016, Scopus: 6507572305, ORCID: 0000-0002-9385-3699; krivoschapko-sn@rudn.ru;

Vyacheslav N. Ivanov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Consultant Professor of the Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; SPIN-code: 3110-9909; i.v.ivn@mail.ru.

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

УДК [550.344.094.7:693.554]:625.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1632-1643

Влияние волновых процессов на армирование плиты основания безбалластного железнодорожного пути

Л.А. Илларионова, А.А. Локтев

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Поскольку конструкции безбалластного железнодорожного пути в настоящее время используются практически только с бесстыковыми решениями организации рельсовой плети, то необходимо отметить, что возникающие в рельсовой плети напряжения влияют на напряженно-деформированное состояние всей конструкции верхнего строения пути. Для определения показателей эксплуатационной надежности верхнего строения пути необходимо, помимо оценки состояния элементов конструкции пути, связанных с геометрией, также оценивать нарушения расчетного напряженного состояния бесстыкового пути, которое может явиться основной причиной отказа по условию нарушения устойчивости плети или ее излому.

Материалы и методы. Предлагается модель плоской конструкции из материала, обладающего анизотропными свойствами, позволяющая учесть зарождение и распространение волновых процессов при действии внешней динамической нагрузки.

Результаты. Традиционные методики расчета армирования железобетонных элементов построены на конструктивных требованиях и на вычислении усредненных показателей вновь образуемого композиционного материала, например, коэффициента армирования, который фактически учитывает только площади поперечного сечения отдельных элементов составной конструкции. Рассмотренные способы построения картины распространения упругих волн в пластине позволяют определить точки, в которых сходятся прямые и отраженные волны различных порядков, которые могут как увеличивать, так и уменьшать суммарную интенсивность волновых процессов, приводя к росту или уменьшению напряжений и деформаций в характерных точках конструкции.

Выводы. Предлагаемые решения наиболее актуальны для конструктивных элементов объектов транспортной инфраструктуры, поскольку именно они испытывают динамическую знакопеременную нагрузку с различной интенсивностью и временными распределениями характерных величин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бесстыковой путь, безбалластная конструкция, волновые процессы, динамическая нагрузка, математическая модель, технологическая схема, воздействие колесной пары

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Илларионова Л.А., Локтев А.А. Влияние волновых процессов на армирование плиты основания безбалластного железнодорожного пути // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1632–1643. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1632-1643

The influence of wave processes on the reinforcement of the base plate of a ballast-free railway track

Lilia A. Illarionova, Alexey A. Loktev

Russian University of Transport (MIIT); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Since nowadays ballast-free track structures are most often used in combination with continuous welded track solutions for organizing a rail string, it should be emphasized that stresses arising in the rail string affect the stress-strain state of the entire construction of the track superstructure; therefore, it is necessary to monitor the current state of the continuous welded track. Nevertheless, kinks are formed and assembled rails and sleepers lose stability during the operational period of a continuous welded track, and methods are needed to determine the pre-failure conditions related to the temperature range of operation of a continuous track.

Materials and methods. In this study, we propose a model of a flat structure made of a material having anisotropic properties, which makes it possible to take account of initiation and propagation of wave processes under the action of an external dynamic load.

Results. The considered methods of simulating the propagation of elastic waves in a plate will make it possible to identify the points where direct and reflected waves of various orders converge; these waves can both increase and reduce the overall intensity of wave processes, leading to an increase or reduction in stresses and deformations in the characteristic points of a structure.

Conclusions. The proposed solutions are most relevant for the structural elements of transport infrastructure facilities, since they are the ones that are exposed to alternating dynamic loads having varying intensity and time distribution of characteristic values.

KEYWORDS: continuous welded track, ballast-free construction, wave processes, dynamic load, mathematical model, technological pattern, wheelset impact

FOR CITATION: Illarionova L.A., Loktev A.A. The influence of wave processes on the reinforcement of the base plate of a ballast-free railway track. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1632-1643. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1632-1643 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время безбалластные конструкции пути разрабатываются во всем мире. Их преимущества можно резюмировать следующим образом: уменьшение высоты конструкции; более низкие требования к обслуживанию и, следовательно, высокая доступность; увеличенный срок службы; высокое поперечное сопротивление гусеницы, которое приводит к будущему увеличению скорости в сочетании с технологией наклона и отсутствием проблем с взбалтыванием балластных частиц на высокой скорости.

Бетонная плита заменяет балласт в безбалластной дорожке плиты. Эта путевая структура широко используется на высокоскоростных железных дорогах в Японии, Германии, Франции и Китае. Пример плиты типа CRTSII представлен на рис. 1.

Данное плитное основание уже показало свое успешное применение в высокоскоростных железнодорожных линиях по сравнению с традиционными балластными путями, но оно все еще подвержено некоторым структурным повреждениям, вызванным нагрузкой от поезда и температурной нагрузкой в процессе эксплуатации. Плиты могут быть сборными или монолитными. Требуется высокий уровень инвестиций, что препятствует широкому использованию плитных путей на открытых линиях в России. Применение более эффективных методов строительства, бетонных составов позволяет снизить затраты на строительство. Как правило, опорный слой бетонного пути и монолитная бетонная плита выполняются на месте. По этой причине следует прибегать к бетонным смесям с высокой удобоукладываемостью.

В связи с тем, что для безбалластного железнодорожного пути используется практически только бесстыковое решение организации рельсовой плети, стоит отметить, что возникающие в рельсовой плети напряжения влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) и устойчивость всех

конструкций пути, с помощью путеизмерительных средств диагностики отслеживают текущее состояние бесстыкового пути. Данная диагностика имеет подсистемы для контроля и оценки устойчивости плетей при температурном напряжении, а также для определения неровностей рельсовых нитей в плане; сдвижек на «маячных» шпалах и изменения геометрических размеров балластной призмы [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для вычисления показателей надежности верхнего строения пути (ВСП) в период эксплуатации необходимо, помимо оценки состояния элементов конструкции пути, связанных с геометрией, также оценивать нарушения расчетного напряженного состояния бесстыкового пути, которое является одной из причин потери устойчивости плети и всего пути, в целом на это большее влияние оказывают нелинейные свойства конструкции железнодорожного пути.

Конструкция бесстыкового пути должна не допускать разрыва плети сдвига рельсошпальной решетки под поездами и быть устойчивой от температурного выброса. Под влиянием температурной и динамической нагрузки в период эксплуатации бесстыкового пути часто наблюдаются изломы и потеря устойчивости рельсошпальной решетки.

Принимая во внимание возможности диагностирования изломов, в связи с существованием сигнальных рельсовых цепей наибольшую опасность представляет отказ по причине потери устойчивости, так как он происходит мгновенно и приводит путь в состояние, не пригодное для пропуска поездов [2, 3].

Плита плотно соприкасается с подстилающим грунтом по всей площади. В начальный момент времени v прогиба линейно зависит от верхней компоненты v подвижного состава. Верхняя компонента появилась из-за прогиба рельсовой плети и из-за дефектов как колесной пары, так и рельса.

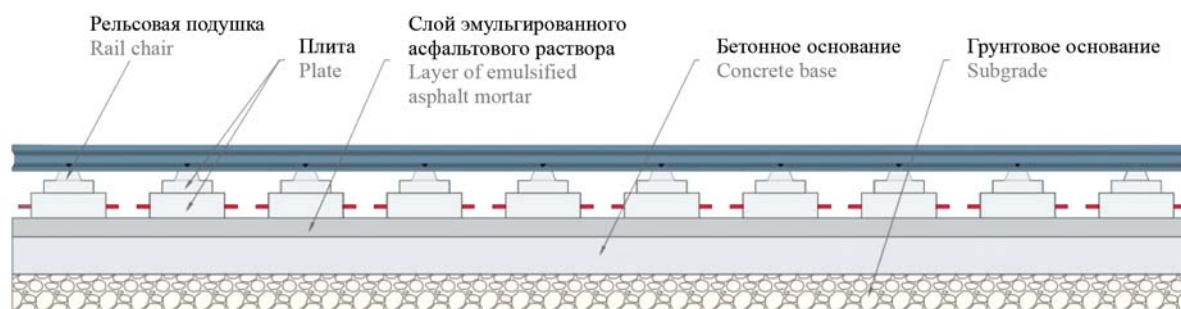


Рис. 1. CRTSII плита пути и ее компоненты
Fig. 1. CRTSII track plate and its components

Введем понятие «базовое состояние бесстыкового пути», необходимое для оценки устойчивости бесстыкового пути.

Базовое состояние бесстыкового пути — это такое состояние, которое соответствует действующим нормам для устойчивой бесперебойной работы данного пути.

Нарушения базового состояния — это изменение значений какого-либо из вышеперечисленных факторов, которое приводит к изменению несущей способности безбалластной конструкции бесстыкового пути в поперечном направлении, что в итоге изменяет значение норм по устойчивости пути.

Критерии базового состояния пути: значения неровностей пути в плане, базовые силы сопротивления плиты поперечному и продольному сдвигу, базовые значения сопротивления кручению рельсов относительно плиты в узлах скреплений.

В общем случае величину изменения нормы устойчивости безбалластной конструкции железнодорожного бесстыкового пути относительно его базового значения можно выразить через поправочный коэффициент $K_{\phi i}$, учитывающий фактическое состояние пути и наличие различных отступлений от норм его устройства и текущего содержания.

Для получения результатов реальных измерений или моделирования определяется значение коэффициента $K_{\phi i}$ из уравнения:

$$K_{\phi i} = \frac{N_{\phi i}}{N_{\text{баз}}}, \quad (1)$$

где $K_{\phi i}$ — коэффициент изменения норматива устойчивости безбалластной конструкции бесстыкового пути, зависящий от величины изменения значения i -го фактора относительно его базового значения; $N_{\phi i}$ — критическая продольная сила сжатия, допускаемая в рельсовых плетях, определенная с учетом влияния величины изменения значения i -го фактора относительно его базового значения; $N_{\text{баз}}$ — критическая продольная сила сжатия, допускаемая в рельсовых плетях, определенная при базовых значениях i -го фактора [4, 5].

Неровность пути в плане является местом локального изменения кривизны рельсовой нити, в котором происходит резкое изменение радиуса от его паспортного значения до значения локального радиуса неровности, а участки пути с неровностями — места локальной концентрации поперечных сдвигающих сил. Наличие таких концентраторов приводит к понижению общей устойчивости пути, величина понижения характеризуется коэффициентом $K_{\text{план}}$ понижения устойчивости, зависящим от состояния пути в плане.

Исходными данными для определения значения этого коэффициента принимаем следующие параметры: форма неровности — смещенная косинусоида; длина неровности (длина волны неровности) — L , м; стрела неровности — f , мм.

За базовое значение неровностей, при которых значение коэффициента $K_{\text{план}} = 1$, приняты следующие неровности: длина неровности — 10 м; стрела неровности — 5 мм.

На основе значений базовых параметров по результатам измерений осуществляется поиск неровностей пути в плане со следующими граничными критериями отбора: длина фактической неровности короче базовой. По результатам поиска путь делится на расчетные участки, границами которых являются границы неровностей. Между границами неровностей путь также делится на расчетные участки длиной по 20 м или менее, в зависимости от границ смежных неровностей и плана линии [6].

Основные элементы ВСП, состояние которых обеспечивает устойчивость безбалластной конструкции железнодорожного пути от поперечного смещения:

- балластная призма или подстилающий слой бетона (формируется сила сопротивления сдвигу плиты поперек оси пути);
- промежуточные скрепления (формируется рамная жесткость совместной конструкции рельса, упругих подкладок — промежуточных опор и бетонной плиты основания).

На основе показаний средств измерений в пределах границ каждого расчетного участка для учета состояния балластной призмы определяются следующие показатели:

$S_{\text{шп}}$ — среднее значение доли сил сопротивления поперечному сдвигу плиты относительно базового значения;

$T_{\text{шп}}$ — среднеквадратичное отклонение доли сил сопротивления поперечному сдвигу плиты относительно базового значения;

$K_{\text{шп}}$ — коэффициент вариации доли сил сопротивления поперечному сдвигу плиты относительно базового значения.

$$K_{\text{шп}} = T_{\text{шп}} / S_{\text{шп}}.$$

Порядок определения параметров:

- для каждого сегмента плиты основания измеряется ширина плеча балластной призмы, наличие пустот под плитой основания [6, 7];
- для каждой плиты вычисляется фактическая доля сил сопротивления поперечному сдвигу $M_{\text{шп}}$ по формуле:

$$M_{\text{шп}} = M_{\text{плечо}} K_{\text{плечо}} + M_{\text{ящика}} K_{\text{ящика}} + M_{\text{подошва}} K_{\text{сцепл}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{плечо}}$ — доля сил сопротивления поперечному сдвигу, формируемая плечом балластной призмы ($M_{\text{плечо}} = 0,2$); $K_{\text{плечо}}$ — коэффициент влияния, зависящий от величины плеча балластной призмы, $K_{\text{плечо}} = 0,7 \cdot \arctg(h_{\text{плечо}}/4,5)$, $h_{\text{плечо}}$ — ширина плеча балластной призмы, см; $M_{\text{ящика}}$ — доля сил сопротивления поперечному сдвигу (от 0,3 до 0,35); $K_{\text{ящика}}$ — коэффициент влияния; $M_{\text{подошва}}$ — доля сил сопротивления поперечному сдвигу, формируемая контактом нижней постели плиты и балласта ($M_{\text{подошва}}$ —

от 0,45 до 0,5); $K_{\text{сцепл}}$ — коэффициент влияния, зависящий от наличия пустот под плитой основания.

Для учета состояния креплений в пределах границ каждого расчетного участка определяются следующие показатели:

$S_{\text{скреп}}$ — среднее значение доли сил сопротивления повороту рельса в узле скрепления относительно базового значения;

$T_{\text{скреп}}$ — значение доли сил сопротивления повороту рельса в узле скрепления относительно базового значения;

$K_{\text{скреп}}$ — коэффициент вариации доли сил сопротивления повороту рельса в узле скрепления относительно базового значения.

Значение комплексного показателя предотказного состояния бесстыкового пути зависит от ряда факторов, которые характеризуют наличие температурных напряжений в рельсовых плетях и удерживающие свойства плиты основания, и можно выразить в следующей функциональной зависимости:

$$K_K = f(K_{\text{угл}}; K_{\text{пл}}; K_{\text{скр}}; K_{\text{бал.пр}}; K_{\text{неп.плп}}; K_{\text{зап.плп}}),$$

где $K_{\text{угл}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути при наличии угона рельсовых плетей; $K_{\text{пл}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути в плане; $K_{\text{скр}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути при нарушении состояния рельсовых креплений; $K_{\text{бал.пр}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути при нарушении ширины плеча балластной призмы; $K_{\text{неп.плп}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути

при наличии пустот под плитами; $K_{\text{зап.плп}}$ — коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути при недозаполнении подплитного пространства.

В табл. 1 показаны оценочные критерии показателей V_2 (значение вероятности выброса бесстыкового пути) и K_K (значение комплексного показателя состояния бесстыкового пути).

В табл. 2 приведены мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыкового пути в зависимости от его состояния, обязательные к выполнению после выдачи результатов проверки в линейное предприятие.

От рельсовой плети динамическая нагрузка от подвижного состава через упругие крепления — промежуточные опоры передается на железобетонную плиту основания. При этом в условиях увеличения скоростей подвижного состава и увеличения общего числа вагонов в подвижном составе важен учет динамических явлений в плите основания.

Колебание ВСП особенно под воздействием динамической нагрузки приводит к возникновению волновых процессов и колебаний.

Стационарные и нестационарные процессы, происходящие в строительных конструкциях, удобнее всего описывать с помощью функции перемещений и напряжений, в заданных условиях или характерных точках конструкции или отдельных элементов. Компоненты напряжений и перемещений, учитывающие динамику воздействий колесной пары и ВСП, связаны с полными значениями функций, определяющих НДС [8].

Волновые процессы в строительных конструкциях описываются с помощью линейных уравнений упругой, вязкоупругой или упругопластической сре-

Табл. 1. Оценочные критерии показателей V_2 и K_K

Table 1. Evaluation criteria for indicators V_2 and K_K

Наименование критерия Criterion	Значение показателя / Indicator value						Неработо- способное Non- serviceable condition
	Исправное Serviceable condition	Работо- способное Operable condition	Ограниченно работоспособное Partially operable condition		Предотказное состояние Pre-failure condition		
			140 км/ч ≥ km/h ≥	>140 км/ч km/h	140 км/ч ≤ km/h ≤	>140 км/ч km/h	
Комплексный показатель предотказного состояния бесстыкового пути K_K A comprehensive indicator of the pre-failure condition of a continuous welded track K_K	$K_K < 1,5$	$1,5 \leq K_K < 2$	$2 \leq K_K < 3$	$2 \leq K_K < 2,5$	$3 \leq K_K < 5$	$2,5 \leq K_K < 5$	$K_K \geq 5$
Вероятность выброса сечения бесстыкового пути V_2 , % [18] Probability of continuous welded track buckling V_2 , % [18]	< 5	$5 \leq V_2 < 10$	$10 \leq V_2 < 18$	$10 \leq V_2 < 14$	$18 \leq V_2 < 34$	$14 \leq V_2 < 34$	$34 \geq$

Табл. 2. Состояние бесстыкового пути и мероприятия, обеспечивающие его устойчивость

Table 2. The condition of a continuous welded track and actions to ensure its stability

Номер состояния бесстыкового пути The number of the condition of a continuous welded track	Характеристика состояния Condition characteristics	Мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыкового пути в зависимости от его состояния Actions ensuring the stability of a continuous welded track depending on its condition
1	Исправное Serviceable condition	Выполняются работы в соответствии с действующими нормативными документами. Дополнительные мероприятия не требуются Works are performed pursuant to effective regulatory documents. No supplementary work is needed
2	Работоспособное Operable condition	Выполняется внеплановый осмотр выявленного и прилегающих пикетов. Определяется фактическая температура закрепления на осмотренных пикетах. Срок осмотра — не более 5 суток с момента выявления. Срок выполнения работ — не позднее 10 суток с момента выявления Unscheduled inspection of defective and adjacent hundred-meter railroad sections is to be performed. Actual stress-free temperature is identified at inspected hundred-meter track sections. The inspection period shall not exceed five days of the problem identification. The term of work performance shall not exceed ten days of the problem identification
3	Ограниченно работоспособное Partially operable condition	По результатам осмотра назначаются работы для устранения выявленных неисправностей — разрядка или регулировка температурных напряжений, протяжка болтов/шурупов, замена неисправных креплений, пополнение или уплотнение балластной призмы и другие работы, необходимые для устранения выявленных неисправностей. Срок осмотра — не более 3 суток с момента выявления. Срок выполнения работ — не позднее 5 суток с момента выявления Subsequent to the inspection results, a schedule of work is compiled to remove the cause of problems, including the relief or regulation of temperature-induced stresses, bolt/bolt screw tightening, replacement of defective clamps, ballast section compaction or replenishment and other types of work to be performed to remove the cause of problems. The inspection term shall not exceed three days of the problem identification. The term of the work performance shall not exceed five days of the problem identification
4	Предотказное Pre-failure condition	В течение первых суток после выявления выполняется разрядка или регулировка температурных напряжений на выявленном и прилегающих пикетах. Выполняется внеплановый осмотр выявленного и прилегающих пикетов. Определяется фактическая температура закрепления на осмотренных пикетах. По результатам осмотра назначаются работы для устранения выявленных неисправностей — протяжка болтов/шурупов, замена неисправных креплений, пополнение или уплотнение балластной призмы и другие работы, необходимые для устранения выявленных неисправностей. Срок осмотра — не более 1 суток с момента выявления. Срок выполнения работ — не позднее 3 суток с момента выявления. Ограничение скорости снимается после выполнения всех работ Within 24 hours of the problem identification, stresses must be relieved or regulated at defective and adjacent hundred-meter track sections. An unscheduled inspection of defective and adjacent hundred-meter track sections is performed. The actual stress-free temperature is identified at inspected track sections. Subsequent to the inspection results, a schedule of work is compiled to remove the cause of problems, including bolt/bolt screw tightening, replacement of defective clamps, ballast section compaction or replenishment and other works to be performed to remove the cause of problems. The inspection term shall not exceed one day of the problem identification. The term of the work performance shall not exceed three days of the problem identification. Speed limits are to be removed upon the performance of all types of work

Окончание табл. 2 / End of Table 2

Номер состояния бесстыкового пути The number of the condition of a continuous welded track	Характеристика состояния Condition characteristics	Мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыкового пути в зависимости от его состояния Actions ensuring the stability of a continuous welded track depending on its condition
5	Неработоспособное Non-serviceable condition	Движение закрывается до выполнения разрядки температурных напряжений. Выполняется внеплановый осмотр выявленного и прилегающих пикетов. Определяется фактическая температура закрепления на осмотренных пикетах. По результатам осмотра назначаются работы для устранения выявленных неисправностей — протяжка болтов/шурупов, замена неисправных креплений, пополнение или уплотнение балластной призмы и другие работы, необходимые для устранения выявленных неисправностей. Срок осмотра — не более суток с момента выявления. Срок выполнения работ — не позднее трех суток с момента выявления. После выполнения разрядки температурных напряжений движение открывается со скоростью 25 км/ч. Ограничение скорости снимается после выполнения всех работ Railroad traffic is banned until temperature-induced stress is relieved. An unscheduled inspection of defective and adjacent hundred-meter track sections is performed. The actual stress-free temperature is identified at inspected track sections. Subsequent to the inspection results, a schedule of work is compiled to remove the cause of problems, including bolt/bolt screw tightening, replacement of defective clamps, ballast section compaction or replenishment and other works to be performed to remove the cause of problems. The inspection term shall not exceed one day of the problem identification. The term of the work performance shall not exceed three days of the problem identification. Upon the relief of temperature-induced stress, the railroad is opened to traffic, and the speed limit is set at 25 km/hour. The speed limit is removed upon the completion of all types of work

ды. Динамические уравнения в дифференциальном виде, определяющие поведение точек таких элементов под воздействием нагрузки различных типов, можно получить из стандартных уравнений равновесия параллелепипеда со сторонами dx , dy , dz , построенного вокруг заданной точки элемента конструкции из материала плотностью ρ . Данные уравнения равновесия удобно выразить через перемещения [9, 10] в декартовых координатах при условии приравнивания к нулю слагаемых с усилиями и добавлением инерционных членов. В результате описанной процедуры получаем:

$$\begin{cases} (x+G)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + G\nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ (x+G)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + G\nabla^2 v = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ (x+G)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + G\nabla^2 w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ — оператор объемной деформации;

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа;

$x = \frac{vE}{(1+\nu)(1-2\nu)}$; E и G — модуль Юнга и сдвига;

ν — коэффициент поперечной деформации; u , v , w — линейные перемещения точек элементов вдоль основных координатных осей Ox , Oy , Oz .

Упростим объемную задачу, учитывая возможность выбора направления координатных осей, которая зависит во многом от исследователя, возможно получить несколько (или одну) задач линейного деформирования. Предположим, что перемещения меняются только вдоль одной координатной оси, а вдоль других они равны нулю, т.е. $u = u(x, t)$; $v = w = 0$.

Для данной ситуации получим:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial \Delta}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \Delta}{\partial z} &= 0; \quad \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad \nabla^2 v = 0; \\ \nabla^2 w &= 0; \quad \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя приведенные соотношения в систему определяющих динамических уравнений (3), можно увидеть, что второе и третье соотношение будут выполняться тождественно, а уравнение под номером один можно записать в следующем виде [11–13]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{x + 2G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

Анализируя данное выражение, введем новое обозначение C_1 , представляющее скорость распространения упругой волны для идеальной среды:

$$C_1 = \sqrt{\frac{x + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (5) обычно находится в виде:

$$u(x, t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{l_1} (x - C_1 t) \right], \quad (7)$$

где A — амплитуда колебательного движения, данная величина находится в прямой зависимости от параметров приложения нагрузки и определяется максимальным перемещением точек среды рассматриваемого элемента; l_1 — длина волны, распространяющейся по выбранному направлению.

Описанные величины позволяют выявить период колебаний:

$$T_1 = \frac{l_1}{C_1}. \quad (8)$$

Из уравнения (6) видно, что на скорость расширения C_1 влияют механические свойства упругой среды.

Для зданий и сооружений транспортной инфраструктуры с целью предотвращения разрушений важно рассмотреть расширение также поперечных волн.

В этом случае перемещения точек среды возможны только по направлению оси z , т.е. $w = w(x, t)$; $v = u = 0$.

Для случая распространения поперечной волны (волны сдвига) характерно выполнение следующих соотношений:

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \Delta}{\partial x} = \frac{\partial \Delta}{\partial y} = \frac{\partial \Delta}{\partial z} = 0;$$

$$\nabla^2 w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \nabla^2 v = 0; \quad \nabla^2 u = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (9)$$

При этом уравнение (3) принимает следующий вид:

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - G \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (10)$$

Здесь можно ввести новое обозначение, определяющее скорость поперечной волны:

$$C_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}. \quad (11)$$

Учитывая, что скорости распространения упругих волновых фронтов зависят от механических свойств материала конструкции, а именно от модуля упругости, коэффициента Пуассона и модуля сдвига, можно показать, что отношение скоростей продольной и поперечной волн зависят только

от коэффициента Пуассона и в полной мере характеризуют свойства материала в двух перпендикулярных направлениях:

$$\frac{C_1}{C_2} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}. \quad (12)$$

Представленное выражение (12) позволяет оценить тот факт, что для изотропных упругих материалов скорость продольной волны всегда больше скорости поперечной волны.

Из определяющего уравнения (10) предлагается найти вертикальные перемещения в направлении оси z при условии существования в пластине поперечной волны. Искомую величину перемещения предлагается искать в следующем виде:

$$w(x, t) = B \sin \left[\frac{2\pi}{l_2} (x - C_2 t) \right], \quad (13)$$

где параметр B обозначает наибольшую величину вертикального перемещения заданной точки при $l_2 = T_2$; C_2 — длина поперечной волны, T_2 — временной интервал, определяющий период для поперечных колебаний.

Изучение упругого однородного материала, описываемого с помощью уравнения (3), говорит о несвязности процессов распространения упругих поперечных и продольных волн в первом приближении. Характер поведения волновых процессов во времени зависит от особенностей приложения динамической нагрузки и может приводить к появлению как отдельных видов волн, так и их различных комбинаций.

Особенности зарождения и распространения волновых поверхностей в пограничном слое позволяют утверждать, что нормальная скорость таких волн C_3 , в первую очередь, зависит от параметров передачи продольных волн и связана с их скоростью следующим соотношением:

$$C_3 = n C_2. \quad (14)$$

Коэффициент n определяется из функционального соотношения:

$$n^6 - 8n^4 \left(3 - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) n^2 - 16 \left[1 - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right] = 0. \quad (15)$$

Соотношение (15) решается численно с учетом конкретных значений коэффициента деформации.

В общем случае, уравнение (15) имеет шесть решений, связанных между собой попарно, из возможных парных значений выбираем наименьшее.

Таким образом, можно отметить, что механические параметры материала задают характеристики распространения упругих волн, верно и обратное утверждение, что вектор значений нормальных скоростей волн определяет свойства материала, в котором эти волны существуют [14].

Волновые процессы характеризуются не только значительными усилиями, но и существенными величинами ускорений, которые приводят к появле-

нию сил инерции, увеличивающих силовые характеристики до значений, определяемых статической нагрузкой. Динамическая нагрузка может вызвать появление силовых характеристик, превосходящих величины, появляющиеся из-за комбинаций статических нагружений, в этом случае к уравнениям движения точек плоского элемента, записанных в перемещениях или деформациях, необходимо присоединить выражения, связывающие напряжения и внутренние усилия.

Зарубежная и отечественная инженерная и научная литература содержит значительное количество различных подходов, алгоритмическое и математическое обеспечение вычислительных схем, учитывающих волновые процессы в деформируемых телах и конструкциях, но вместе с тем слабым местом описанных подходов является стандартизация и верификация предлагаемых методик с учетом широкого спектра параметров приложения нагрузки, свойств материала и конструкции, а также условий их изготовления и эксплуатации.

Построение волновой картины существования упругих волн можно представить в виде следующих этапов:

1) В первые моменты после приложения динамической нагрузки в определенной точке, в ее окрестности зарождаются и начинают расширяться с нормальными скоростями продольные и поперечные волновые поверхности (рис. 2), первоначальное количество упругих волн устанавливается метрикой определяющих уравнений. Результаты численного моделирования показывают, что наибольшие напряжения на данном этапе возникают непосредственно в области приложения динамической нагрузки, на противоположной грани плоского элемента и в точках встречи прямых и отраженных волн, распространяющихся по толщине пластинки [15, 16].

2) Претерпев некоторое число отражений k , упругие волны, искривляя свои фронты, удаляются от области приложения внешней нагрузки и из преимущественно сферических на расстоянии $\sqrt{k} \approx \sqrt{k+1}$ превращаются в цилиндрические (рис. 2), т.е. зарождение волн-полосок в плоском элементе происходит при условии

$$\sqrt{k} \approx \sqrt{k+1} \leq \frac{R}{h}, \quad (16)$$

где h — толщина плоского элемента, моделирующего плиту основания железнодорожного пути.

Расчеты показывают, что на данном этапе значения напряжений на фронтах упругих волн увеличиваются при приближении к области приложения динамической нагрузки.

3) Волновые поверхности отражаются от граней плоского элемента и встречаются с более медленными волновыми поверхностями, это приводит к наложению значений напряжений на фронтах и обуславливает локальное увеличение отдельных величин.

4) Упругие волновые поверхности, отраженные от границы раздела сред, возвращаются к месту своего зарождения, вблизи которого взаимодействуют с волновыми поверхностями, распространяющимися не по длине плоского элемента, а по его толщине. Это приводит к возникновению локальных, сглаженных экстремумов под областью приложения внешней нагрузки.

На рис. 2 показана схема динамического взаимодействия колесной пары и ВСП.

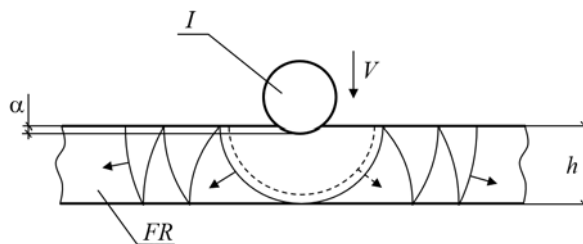


Рис. 2. Схема динамического взаимодействия колесной пары и верхнего строения безбалластного железнодорожного пути

Fig. 2. The diagram of dynamic interaction between the wheelset and the superstructure of a ballast-free railway track

На рис. 2 приняты следующие обозначения: I — колесная пара; FR — фрагмент конструкции безбалластного железнодорожного пути; V — вертикальная компонента скорости следования подвижного состава; h — толщина безбалластной конструкции пути; α — местные деформации в зоне контакта колеса и рельса. Сплошные кривые обозначают фронт продольной волны, а пунктирные — поперечной; стрелками указано направление распространения волн.

Учет изложенных выше предложений по влиянию появления и распространения волновых процессов в плите основания безбалластного железнодорожного пути достаточно хорошо может быть реализован в квазистатической постановке в виде следующей технологической схемы создания безбалластной конструкции железнодорожного пути.

Последовательное устройство пути: перед заливкой цементно-эмульгированного асфальтового раствора (ЦЭА) необходимо проверить состояние пути на подрельсовом основании и убедиться в том, что его положение соответствует конструктивным параметрам, предварительно необходимо смочить бетонное основание. ЦЭА раствор распыливают через опрыскивающие отверстия на середине пути сплошного подрельсового основания, заливка ЦЭА раствора для каждого пути производится только один раз [17, 18]. В конструкции безбалластного железнодорожного пути цементно-асфальтовый раствор, вводимый между бетонным полотном дороги и полотном пути, является одной из самых важных частей, которая выполняет функцию амортизирующего слоя, выполняя такие важные роли,

как поддержка, регулировка, передача нагрузки, поглощение вибрации, изоляция от ударов и т.д., а также повышение прочности путевой конструкции, безопасности движения и уровня комфорта высокоскоростных поездов. Далее необходимо выполнить натяжение продольной арматуры. Процесс натяжения арматуры должен осуществляться после того, как прочность ЦЭА раствора достигнет 9 МПа, а прочность бетона узкого стыка — 20 МПа. Затем происходит заливка широкого стыка бетона. Бетон заливают сразу после соединения продольной арматуры. Значение силы натяжения следует перепроверить перед заливкой. После завершения заливки она должна подвергнуться вибрационному уплотнению, бетонная поверхность выполняется в уровень с поверхностью подрельсового основания [19, 20]. Последовательность натяжения продольной арматуры показана на рис. 3.

Каждый широкий и узкий стык снабжен шестью натяжными зажимами. Зажимы натягиваются в последовательности от внутренних к наружным. Общая сила натяжения 300 кН приходится на шесть продольных арматур, и сила натяжения каждой продольной арматуры составляет 50 кН.

Последовательность натяжения:

- Шаг 1: натянуть внутренние зажимы между плитами 1–2–3.
- Шаг 2: последовательно натянуть внутренние зажимы между плитами 1–5–4 и 3–6–7.
- Шаг 3: натянуть средние зажимы между плитами 1–2–3.
- Шаг 4: продолжить натяжение внутренних зажимов между плитами 3–9–8 и 7–10–11 и одновременно натянуть два средних зажима между плитами 1–5–4 и 3–6–7.

- Шаг 5: натянуть наружные зажимы между плитами 1–2–3 после натяжения шести средних зажимов.

Продольная арматура натягивается в данной последовательности до завершения построения пути. Последовательность натяжения показана на рис. 3.

В этой статье предполагается, что предельная прочность от эквивалентного напряжения такая же, как и прочность при сдвиге, по причине того, что значение нормального напряжения намного меньше, чем значение напряжения сдвига в процессе испытания на толкание, а нормальная прочность на сжатие немного больше, чем прочность на сдвиг, результаты эксперимента получены на границе раздела. Провели испытание на растяжение концевое соединение рельсовой пластины. Расположение точки измерения и результаты измерения показаны на рис. 4, а и b.

Безбалластный путь подвергается воздействию температурной нагрузки после растяжения продольной арматуры и перед заливкой широкого стыка, поэтому учитывалась только температурная градиентная нагрузка, вызванная суточным изменением температуры из-за короткого интервала времени между заливкой и растяжением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные подходы, связанные с расположением армирующих металлических элементов в железобетоне, базируются на увязке взаимного размещения рабочей и конструктивной арматуры. При этом основные характеристики вновь получаемого композитного материала являются приведенными величинами, нормированными, например, площадью поперечного сечения или суммарной площадью арматуры.

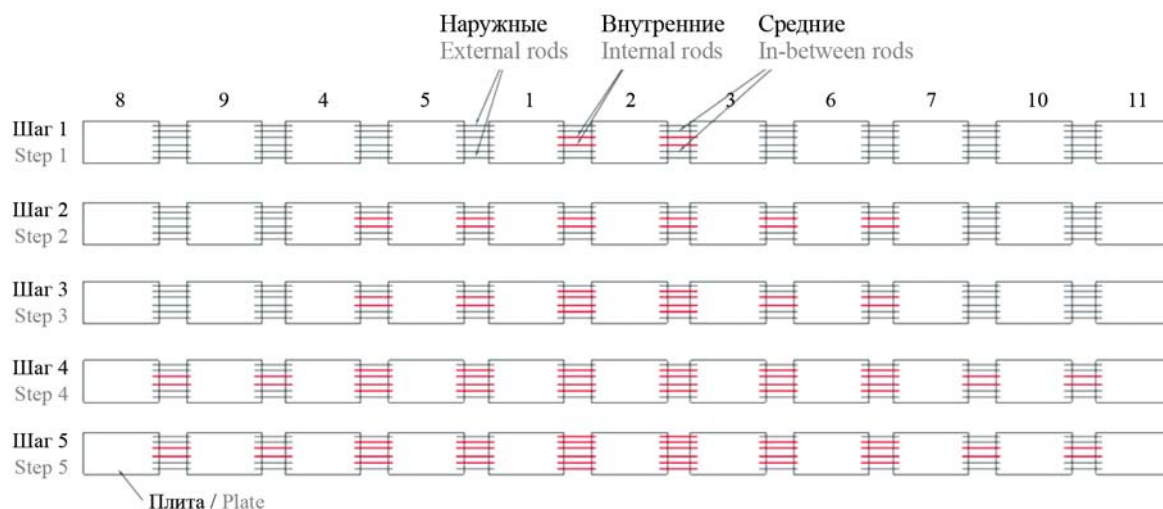


Рис. 3. Последовательность натяжения продольного армирования

Fig. 3. Sequential tensioning of the longitudinal reinforcement

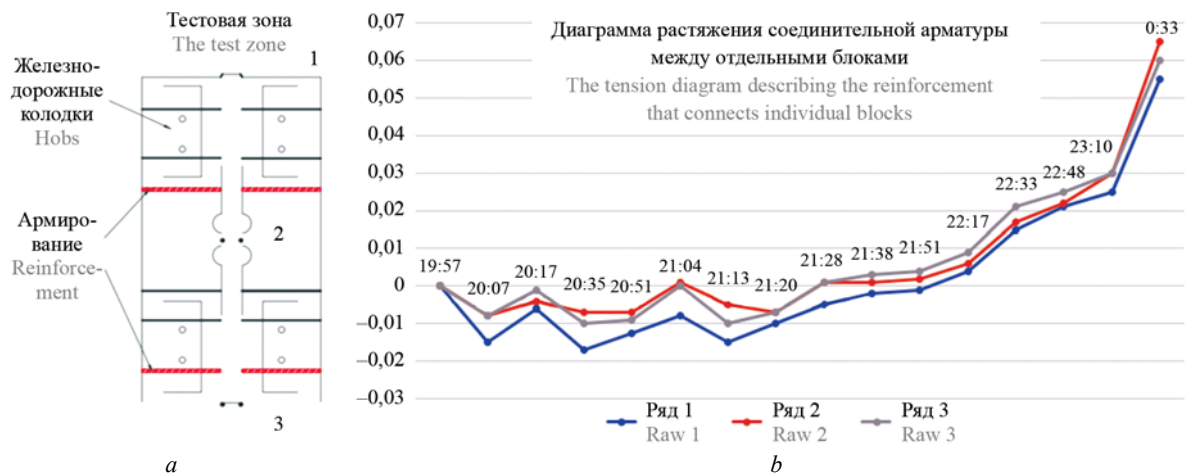


Рис. 4. Точки растяжения и результаты испытаний продольной арматуры: *a* — точка измерения натяжения продольной соединительной арматуры; *b* — диаграмма растяжения соединительной арматуры между отдельными блоками

Fig. 4. Points of elongation and longitudinal reinforcement testing results: *a* — a point for longitudinal reinforcement tension measurement; *b* — a tension diagram describing the reinforcement that connects individual blocks

В то же время традиционные методики армирования учитывают динамическое приложение нагрузки только в квазистатической постановке, предполагающей учет особенностей изменения нагрузки от времени через совокупность увеличивающихся коэффициентов. В настоящей работе реализуется подход, основанный на составлении картины распространения упругих волн в ортотропной пластине, моделирующей железобетонную плиту, и определении местоположения волновых фронтов как прямых, так и отраженных волн в различные моменты времени. С помощью такой постановки задачи выявляются точки схождения различных фронтов волн, которые могут как увеличивать результирующие напряжения в материале, так и уменьшать их. Располагать рабочую арматуру предлагается как раз в местах, где происходит увеличение абсолютной величины напряжений при взаимодействии упругих волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Актуализация предложенной методики позволит разрабатывать схему армирования конструкции безбалластного пути с учетом высокочастотной и гигацикловой нагрузки. В точках взаимодействия прямых и отраженных волн предлагается установка арматурных стержней с привязкой их в каркас с учетом области, в которой напряжение уменьшается за счет взаимодействия факторов. Данная методика может быть реализована в виде методических рекомендаций при строительстве высокоскоростных железнодорожных линий на основе безбалластных конструкций основания для рельсошпальной решетки железнодорожного пути. Такой подход даст возможность более точно описать динамическое поведение основания пути при действии подвижной динамической нагрузки и избежать существенного перерасхода материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савин А.В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 2. С. 2–8.
2. Абдурашитов А.Ю., Сычев В.П., Абдурашитов Ю.А. Выбор моделей напряженно деформированного состояния железнодорожных рельсов при различных вариантах их закаливании // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 10. № 10 (10). С. 64–79.
3. Кошкаров В.Е., Самуйлов В.М., Кошкаров Е.В. Новая технология проектирования и строительства высокоскоростных железнодорожных

- магистралей // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 35–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-35-40
4. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical modeling of railway track structure under changing rigidity parameters // Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics. 2017. Pp. 291–307.
5. Savin A., Korolev V. Span operational aspects under offsetting the axis of the track panel // TransSiberia VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2019. Pp. 797–808. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_78

6. Сычева А.В., Сычев В.П., Бучкин В.А., Быков Ю.А. Моделирование работы железнодорожного пути как системы квазиупругих ортотропных слоев // Вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 37–46.

7. Петров А.В. Эластичные прокладки рельсовых креплений — фундаментальная часть безбалластного пути // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 14. № 14 (14). С. 87–93.

8. Loktev A.A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand–Mindlin plate // Acta Mechanica. 2011. Vol. 222. Issue 1–2. Pp. 17–25. DOI: 10.1007/s00707-011-0517-8

9. Loktev A., Sychev V., Gluzberg B., Gridasova E. Modeling the dynamic behavior of railway track taking into account the occurrence of defects in the system wheel-rail // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00108. DOI: 10.1051/mateconf/201711700108

10. Savin A.V. The service life of ballastless track // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp. 379–385. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060

11. Савин А.В., Третьяков К.И., Петров А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т груза брутто // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 8. С. 25–28.

12. Колос А.Ф., Петрова Т.М., Сидоренко А.А. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали // Техника железных дорог. 2013. № 2 (22). С. 42–47.

13. Поляков В.Ю., Данг Н.Т. Безбалластное мостовое полотно на всм // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 36–55.

14. Goremikins V., Serdjuks D., Buka-Vaivade K., Pakrastins L., Vatin N. Prediction of behaviour of prestressed suspension bridge with timber deck panels // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2017. Vol. 12. Issue 4. Pp. 234–240. DOI: 10.3846/bjrbe.2017.29

15. Савин А.В., Михайлов С.В. Экспериментально-теоретический метод определения параметров безбалластного пути // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6 (72). С. 29–39.

16. Коган А.Я., Савин А.В. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути // Вестник ВНИИЖТ. 2015. Т. 76. № 1. С. 3–9.

17. Savin A.V., Korolev V.V., Shishkina I.V. Determining service life of non-ballast track based on calculation and test // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. P. 022035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022035

18. Savin A., Suslov O., Korolev V., Loktev A., Shishkina I. Stability of the continuous welded rail on transition sections // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Pp. 648–654. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_62

19. Савин А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1 (68). С. 18–21.

20. Shishkina I. Determination of contact-fatigue of the crosspiece metal // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Pp. 835–844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82

Поступила в редакцию 13 сентября 2020 г.

Принята в доработанном виде 11 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Лилия Алексеевна Илларионова** — старший преподаватель кафедры зданий и сооружений на транспорте; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))**; 125190, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2; SPIN-код: 3706-4022, Scopus: 57215419819, ORCID: 0000-0002-3432-8982; illarionova.roat@mail.ru;

Алексей Алексеевич Локтев — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))**; 125190, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2; SPIN-код: 5766-6018, Scopus: 35618959900; ResearcherID: W-1762-2017; ORCID: 0000-0002-8375-9914; aaloktev@yandex.ru.

REFERENCES

1. Savin A.V. Criteria for choosing the design of a ballastless track. *Path and Track Economy*. 2014; 2:2-82. (rus.).

2. Abdurashitov A.Yu., Sychev V.P., Abdurashitov Yu.A. The choice of models of the stress-strain state of railway rails with various options for their hardening. *Introduction of modern designs and advanced technologies in track facilities*. 2016; 10(10):(10):64-79. (rus.).

3. Koshkarov V.E., Samuilov V.M., Koshkarov E.V. New technology of designing and building high-speed railway mainlines. *Transport of the Urals*. 2018; 4(59):35-40. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-35-40 (rus.).

4. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical modeling of railway track structure under changing rigidity parameters. *Nonlinearity. Problems,*

Solutions and Applications. Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics. 2017; 291-307.

5. Savin A., Korolev V. Span operational aspects under offsetting the axis of the track panel. *TransSiberia VIII International Scientific Siberian Transport Forum.* 2019; 797-808. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_78

6. Sycheva A.V., Sychev V.P., Buchkin V.A., Bykov Yu.A. Modeling of railway track operation as a system of quasi-elastic orthotropic layers. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 3:37-46. (rus.).

7. Petrov A.V. Elastic pads of rail fastenings — a fundamental part of a ballastless track. *Implementation of modern designs and advanced technologies in track facilities.* 2019; 14(14):14:87-93. (rus.).

8. Loktev A.A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand–Mindlin plate. *Acta Mechanica.* 2011; 222(1-2):17-25. DOI: 10.1007/s00707-011-0517-8

9. Loktev A., Sychev V., Gluzberg B., Gridasova E. Modeling the dynamic behavior of railway track taking into account the occurrence of defects in the system wheel-rail. *MATEC Web of Conferences.* 2017; 117:00108. DOI: 10.1051/mateconf/201711700108

10. Savin A.V. The service life of ballastless track. *Procedia Engineering.* 2017; 189:379-385 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060

11. Savin A.V., Tretyakov K.I., Petrov A.V. Transitions zone after 1.1 billion tons of gross cargo. *Path and track facilities.* 2019; 8:25-28. (rus.).

12. Kolos A.F., Petrova T.M., Sidorenko A.A. Problems of RHEDA 2000 ballastless track superstructure construction exploitation at rail main line. *Technics of Railways.* 2013; 2(22):42-47. (rus.).

13. Polyakov V.Yu., Dang N.T. Ballastless pavement on the whole station. *World of Transport.* 2018; 16:2(75):36-55. (rus.).

14. Goremikins V., Serdjuk D., Buka-Vaivade K., Pakrastins L., Vatin N. Prediction of behaviour of pre-stressed suspension bridge with timber deck panels. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering.* 2017; 12(4):234-240. DOI: 10.3846/bjrbe.2017.29

15. Savin A.V., Mikhailov S.V. Experimental and theoretical method for determining the parameters of ballastless track. *Bulletin of Transport of the Volga Region.* 2018; 6(72):29-39. (rus.).

16. Kogan A.Y., Savin A.V. Method for determining design life of ballastless way. *VNIIZHT Scientific Journal.* 2015; 76(1):3-9. (rus.).

17. Savin A.V., Korolev V.V., Shishkina I.V. Determining service life of non-ballast track based on calculation and test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019; 687:022035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022035

18. Savin A., Suslov O., Korolev V., Loktev A., Shishkina I. Stability of the Continuous Welded Rail on Transition Sections. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum.* 2020; 648-654. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_62

19. Savin A.V. The choice of track design for high-speed traffic. *Transport of the Russian Federation.* 2017; 1(68):18-21. (rus.).

20. Shishkina I. Determination of contact-fatigue of the crosspiece metal. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum.* 2020; 835-844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82

Received September 13, 2020.

Adopted in revised form on December 11, 2020.

Approved for publication on December 14, 2020.

B I O N O T E S: **Lilia A. Illarionova** — Lecturer of the Department of Buildings and Structures in Transport; **Russian University of Transport (MIIT)**; 22/2 Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation; SPIN-code: 3706-4022, Scopus: 57215419819, ORCID: 0000-0002-3432-8982; illarionova.roat@mail.ru;

Alexey A. Loktev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction, **Russian University of Transport (MIIT)**; 22/2 Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation; SPIN-code: 5766-6018, Scopus: 35618959900, ResearcherID: W-1762-2017, ORCID: 0000-0002-8375-9914; aaloktev@yandex.ru.

Определение фактического коэффициента перебора (участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица»)

А.З. Тер-Мартirosян¹, И.О. Исаев², А.С. Алмакаева¹

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

² АО «Мосинжпроект»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При сооружении тоннелей закрытым способом с помощью механизированных тоннелепроходческих комплексов возникают дополнительные деформации зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния строительства. Для того чтобы учесть дополнительные осадки, в расчет вводится коэффициент перебора грунта, зависящий от конструктивных особенностей щита и технологии нагнетания тампонажной смеси за обделку, давления пригруза в забое щита, а также инженерно-геологических условий. Цель работы — определение фактических коэффициентов перебора грунта для увеличения выборки и определения нормативных усредненных величин перебора для дальнейшего их применения при проектировании.

Материалы и методы. Рассматривается проходка перегонного тоннеля на участке линии от станции «Стахановская улица» до станции «Нижегородская улица». В расчеты, проводимые в программном комплексе PLAXIS 2D и PLAXIS 3D, закладывался проектный коэффициент перебора грунта, значения которого были приняты с учетом требований нормативной документации, а также путем последовательной итерации подобран коэффициент перебора, соответствующий фактической осадке зданий и сооружений, определенной по данным мониторинга.

Результаты. Как показали расчеты, фактический коэффициент перебора грунта для данного участка строительства варьируется в диапазоне от 0,1 до 1,2 %, что значительно меньше значений, закладываемых в проект в соответствии с нормативной документацией. В трехмерной постановке величины фактических коэффициентов перебора в 2–4 раза превышают величины коэффициентов, полученных в двухмерной постановке, при одинаковом значении фактической осадки здания.

Выводы. Поскольку фактическая осадка зданий оказалась меньше, чем расчетная, возможно уменьшить стоимость строительства тоннелей закрытым способом за счет снижения стоимости защитных мероприятий зданий и сооружений окружающей застройки, попадающих в зону влияния проходки тоннеля, без нарушения техники безопасности, а также снижения количества сооружений, попадающих в расчетную зону влияния и, соответственно, снижения затрат на ведение геодезического мониторинга за смещениями данных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: закрытый способ строительства, щитовая проходка, коэффициент перебора грунта, геодезический мониторинг, фактическая осадка, расчетная осадка, ТПМК, оценка влияния

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Исаев И.О., Алмакаева А.С. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица») // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1644–1653. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1644-1653

Identification of the actual excess excavation ratio (Stakhanovskaya street – Nizhegorodskaya street site)

Armen Z. Ter-Martirosyan¹, Ilya O. Isaev², Anastasia S. Almakaeva¹

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

² JSC “Mosinzhproekt”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Redundant strain arises in buildings and structures in areas of construction work influence caused by the deep bore tunneling performed by tunnel boring machines. The strain analysis must include an excess excavation ratio that depends on the structural features of the shield, the technology of grouting mixture injection outside the lining, the counterweight pressure applied to the shield face and geotechnical conditions so that excessive settlement could be taken account of. The purpose of the article is to identify actual values of the excess excavation ratio to raise excavation and determine the values of standard averaged excess excavation to be further applied in design.

Materials and methods. This paper focuses on tunnel driving between “Stakhanovskaya Street” and “Nizhegorodskaya Street” stations. The project excess excavation ratio was applied pursuant to the regulatory documents in order to perform the analysis using PLAXIS 2D and PLAXIS 3D software packages. The method of sequential iteration was applied to identify the value of excess excavation in line with the actual settlement of buildings and structures obtained by means of monitoring.

Results. The analysis has shown that the actual excess excavation ratio varies between 0.1 and 1.2 % for this construction site which is below the values required by the regulatory documents. As for the 3D setting, the values of actual excess excavation ratios are 2 to 4 times higher than those obtained for the 2D setting, although the value of the actual building settlement remains the same.

Conclusions. Since the actual building settlement is smaller than the projected one, the cost of deep bored tunneling can be reduced by cutting the cost of protection of nearby buildings and structures within the area of tunneling influence without violating any safety requirements and also by reducing the number of buildings within the projected area of influence, and respectively, by reducing the cost of geodetic monitoring over their displacements.

KEYWORDS: trenchless construction, shield driving, excess excavation ratio, geodetic monitoring, actual settlement, projected settlement, tunnel boring machine, influence assessment

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Isaev I.O., Almakaeva A.S. Identification of the actual excess excavation ratio (Stakhanovskaya street – Nizhegorodskaya street site). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1644-1653. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.12.1644-1653 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые темпы роста городов и численности населения в современном мире приводят к необходимости развития транспортной инфраструктуры. В крупных городах движение надземного транспорта затруднено из-за большого количества машин, которое непрерывно увеличивается из года в год. Для снижения нагрузки на наземный трафик необходимо осваивать подземное пространство с целью строительства объектов метрополитена, которые позволят обеспечить бесперебойное движение транспорта, и, следовательно, быстрое передвижение людей по городу. В связи с возможностью возникновения дополнительных деформаций дневной поверхности и близлежащих зданий, и сооружений в результате проходки тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) требуется проводить оценку влияния строительства на близлежащие здания и сооружения, расположенные в предварительно назначенной зоне влияния для обеспечения их сохранности и эксплуатационной надежности [1].

В своей работе при помощи численного моделирования Л.А. Строкова [2] показала, что значительное влияние на дополнительные перемещения зданий окружающей застройки оказывают методы проходки закрытых выработок и изменение расстояния между осями сдвоенных тоннелей. Меньшее влияние на дополнительную осадку оказывает вид грунта: при приблизительно одинаковой глубине заложения тоннеля в глинистых грунтах осадка составила 13–17 мм, в песчаных — не более 20 мм. К.У. Kim [3] с соавторами предложили эмпирическую модель для прогнозирования осадок дневной поверхности в зависимости от работы ТПМК в скальных грунтах, на производительность которого наибольшее влияние оказывает RMR. В ряде зарубежных трудов были рассмотрены различные способы оценки влияния параметров щитового комплекса при закрытой проходке на деформации грунтового массива [4–9]. В своем исследовании на основании сравнения аналитических расчетов с натурными наблюдениями L. Cao с соавторами [10] показали влияние «продольного эффекта» при

нагнетании бетонной смеси за обделку на оседание грунта впереди и позади участка нагнетания вдоль оси тоннеля. В работе [11] авторами обратным расчетом определялись фактические коэффициенты перебора грунта для участка перегонного тоннеля диаметром 10,3 м, расположенного от станции «Окская улица» до станции «Стахановская улица». Результаты численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 2D показали, что фактические коэффициенты перебора превышают проектные в 6 раз и варьируются в диапазоне от 0,55 до 1,30. Аналогичные расчеты для определения потерь объемов грунта в процентах проводились А.Н. Rezaeri с соавторами [12, 13] при прокладке двух линий Тебризского метро методом щитовой проходки и V. Fargnoli с соавторами [14] новой линии № 5 Миланского метро, а при отсутствии площадок со схожими инженерно-геологическими условиями и типом тоннелепроходческого оборудования, потери объемов грунта определялись по Гауссовской эмпирической кривой. В публикации [15] предлагается рассматривать четыре компоненты потери объема для более эффективного прогнозирования осадок дневной поверхности при учете данных мониторинга. Отметим, что на текущий момент в нормативной литературе¹ значения коэффициента перебора представлены исключительно для коммуникационных тоннелей. Значения коэффициента перебора при строительстве тоннелей метрополитена в нормативной литературе не представлены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Коэффициентом перебора является отношение площади удаляемого при проходке грунта, расположенного в пределах контура выработки, к площади поперечного сечения выработки². Основными факторами, влияющими на его величину, служат конструктивные особенности тоннелепроходческой ма-

¹ СП 249.1325800.2016. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами.

² Moller S.C. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Stuttgart : Sven Christian Moller Publ., 2006.

шины, так как диаметр резания превышает диаметр хвостовой части щита, технологическая последовательность нагнетания тампонажного раствора за обделку, инженерно-геологические условия, а также тщательный контроль за технологическими параметрами: давлением пригруза, объемами разрабатываемого грунта и т.п. для недопущения простоев щита и аварийных ситуаций [16, 17]. Кроме того, дополнительные вертикальные деформации зданий зависят от жесткости их конструкций, компоновочных решений в плане, типа фундамента и положения зданий относительно оси тоннеля [18].

Ранее обоснование предварительного расчетного значения перебора грунта при моделировании задачи в геотехнических программных комплексах производилось на основании таблицы Ж.1 СП 249.1325800.2016. Однако многочисленные анализы результатов данных геодезического мониторинга показали, что зачастую реальные деформации зданий намного меньше тех, что продемонстрировали результаты численного моделирования. Таким образом, заложение в расчет коэффициентов перебора по работе [4] приводит к удорожанию строительства вследствие применения различных защитных мероприятий для фундаментов зданий и коммуникаций окружающей застройки³. К тому же данный нормативный документ применим только к микротоннелям для прокладки коммуникаций [19]. В настоящее время выбор коэффициента перебора грунта определяется, исходя из опыта проектирования строительных организаций.

³ СТО 36554501-028-2012. Оценка влияния строительства коммуникационных тоннелей щитовым методом на окружающую застройку.

Для определения фактического коэффициента перебора грунта, наиболее точно моделирующего реальные деформации оснований зданий и сооружений, необходимо провести обратный расчет методом численного моделирования путем подбора такого коэффициента перебора, который позволит получить осадки, аналогичные или близкие по значению к фактическим осадкам, полученным по данным геодезического мониторинга. С этой целью был проведен численный расчет в двухмерной и трехмерной постановке в геотехническом программном комплексе PLAXIS 2D и PLAXIS 3D. Коэффициент перебора грунта определялся на рассматриваемом участке строительства перегонного тоннеля от ст. «Стахановская улица» до ст. «Нижегородская улица», этап 11.4 от ПК 131.00 до ПК 137.00. В расчетную зону влияния попало семь существующих зданий. Расстояние от отметки подошвы фундаментов до отметки шельги свода варьируется от 13,8 до 21,4 м. Диаметр строящегося перегонного тоннеля составляет 10,3 м, толщина обделки — 450 мм. Проходка осуществляется ТПМК фирмы Herrenknecht с диаметром резания Ø10,69 м. В данном типе щитов нагнетание тампонажного раствора производится в хвостовой части оболочки тоннелепроходческого комплекса. В забое располагаются преимущественно мелкие и пылеватые водонасыщенные пески, следовательно, согласно нормативной документации, коэффициент перебора составляет 3,5 %. Однако, учитывая тенденцию с завышением расчетных деформаций, в проекте был принят коэффициент 2,5 %. На рис. 1 приведен инженерно-геологический разрез с посадкой на него перегонного тоннеля.

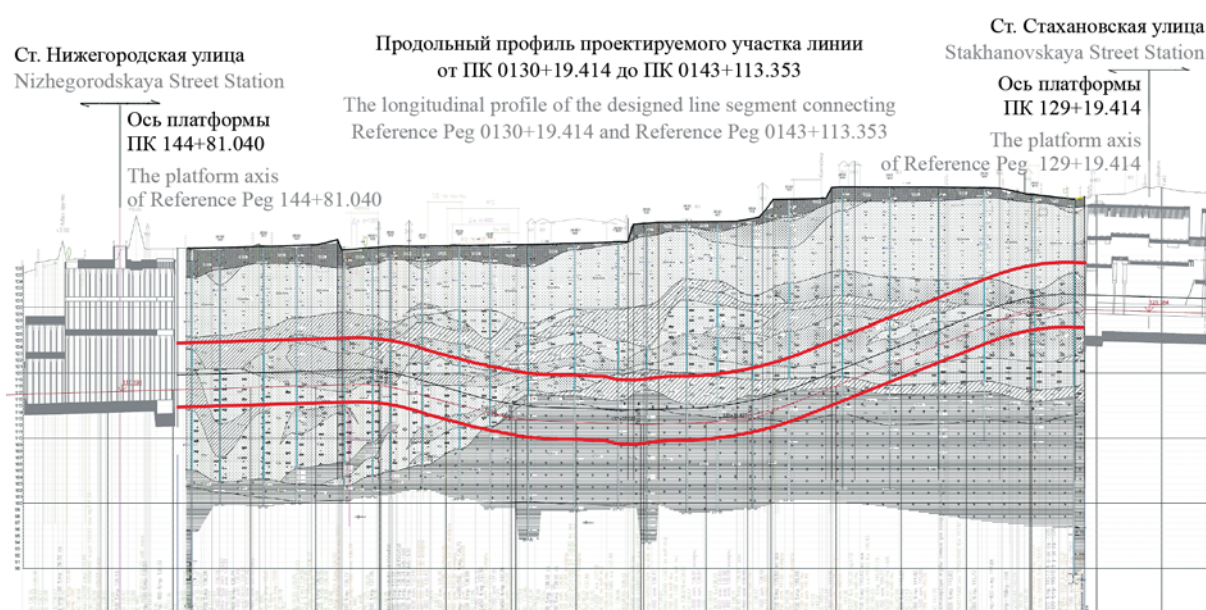


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез с посадкой тоннеля

Fig. 1. Geotechnical cross section featuring the tunnel

Из рис. 2 видно, что в предварительную зону влияния (фиолетовый цвет) строящегося тоннеля на рассматриваемом участке попадает 6 зданий окружающей застройки. Дополнительно на плане указано расположение расчетных сечений, моделируемых в двухмерной постановке. На рис. 3 изображена одна из расчетных схем задачи, рассчитанной в PLAXIS 2D, с указанием строящегося тоннеля и здания, расположенного по адресу: Рязанский пр-т, д. 2, стр. 27.

На рис. 4 представлена расчетно-деформированная схема № 1 в трехмерной постановке, где рассматривался участок перегонного тоннеля от ПК 131.00 до ПК 134.00 и три здания, расположенных по адресу: Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 2; Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 3 и Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 8.

На рис. 5 показана расчетно-деформированная схема № 2 участка перегонного тоннеля от ПК 134.00 до ПК 137.00 и три здания, расположенных по адресу: Рязанский пр-т, д. 4; Рязанский пр-т, д. 2, стр. 27 и Рязанский пр-т, д. 2, стр. 26.

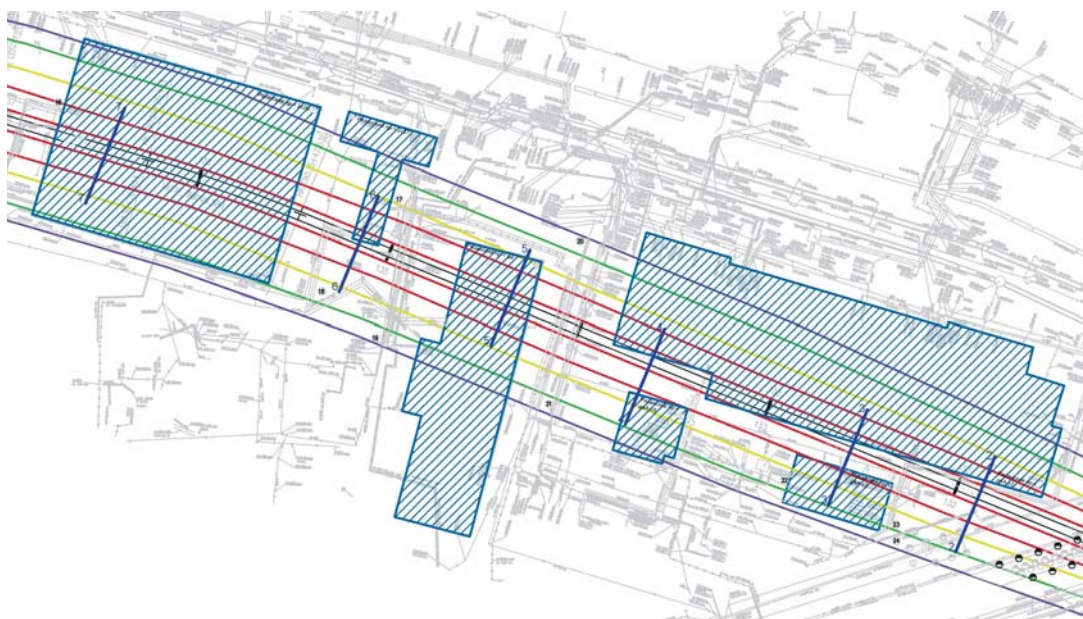


Рис. 2. План расположения трассы строящегося тоннеля (красный цвет) относительно существующих зданий окружающей застройки (синий цвет)

Fig. 2. Tunnel route (red line) amid the existing buildings in the built-in area (blue line)

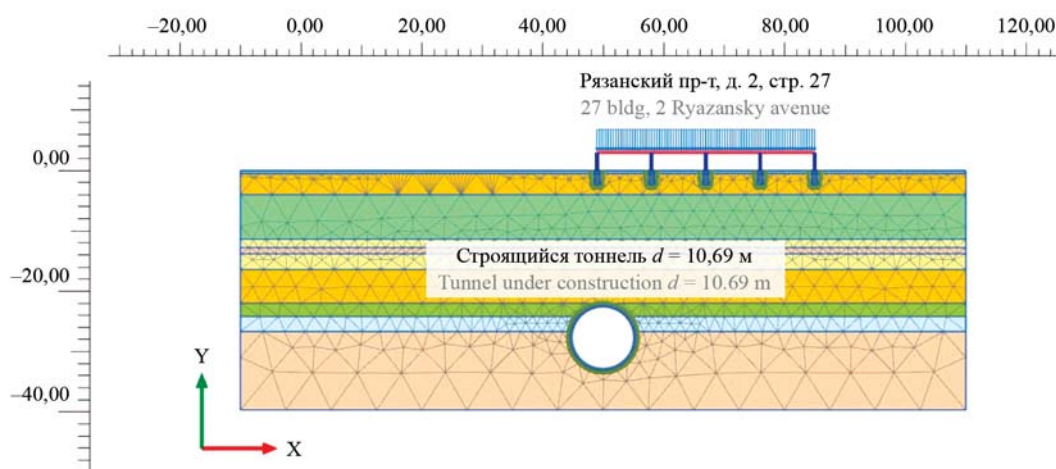


Рис. 3. Расчетная схема 2D-модели (сечение 6-6)

Fig. 3. 2D model analysis pattern (section 6-6)

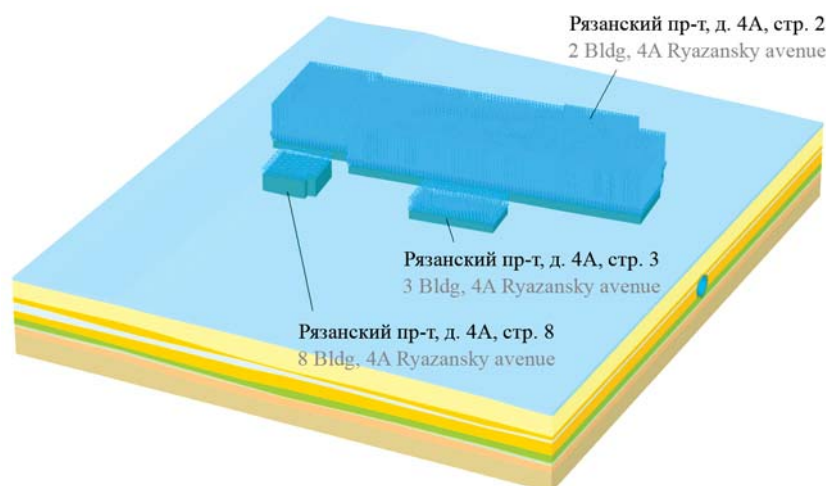


Рис. 4. Расчетно-деформированная схема № 1 3D-модели

Fig. 4. Redundant strain pattern 1 for the 3D model

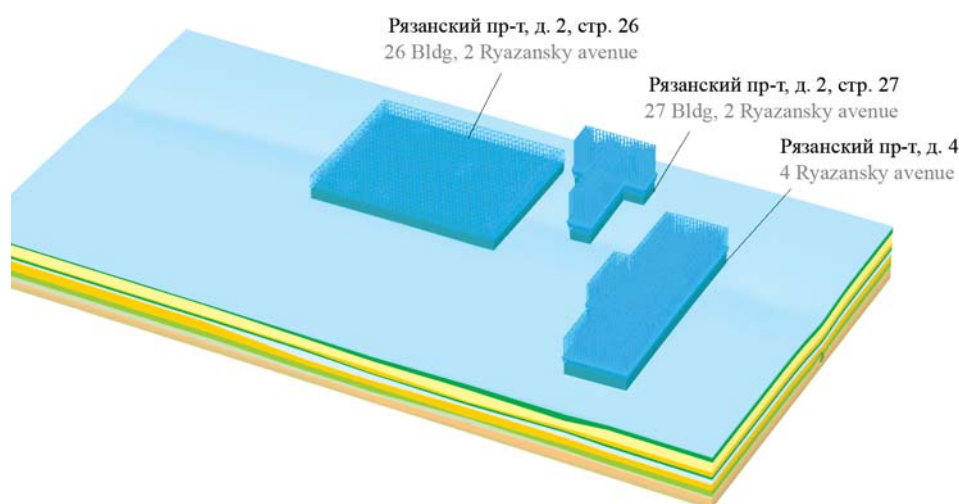


Рис. 5. Расчетно-деформированная схема № 2 3D-модели

Fig. 5. Redundant strain pattern 2 for the 3D model

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методом последовательных итераций обратным расчетом были получены фактические коэффициенты перебора грунта на этапе завершения строительства перегонного тоннеля. В таблице представлены результаты численного моделирования и данные геодезического мониторинга. Согласно произведенным расчетам, полученные осадки в двухмерной постановке превышают фактические в 3–25 раз, а в трехмерной постановке — в 2–25 раз, т.е. коэффициент перебора в основном не превышает 1 % и варьируется в диапазоне от 0,1 до 1,2 %. Также можно отметить, что дополнительные осадки зданий при проектном коэффициенте перебора в двухмерной постановке значительно выше, чем в трехмерной, а в случае обратного расчета при приблизительно одинаковых вертикальных деформациях зданий ко-

эффициенты перебора, полученные в PLAXIS 3D, получились больше, чем те коэффициенты, что были получены в PLAXIS 2D. Полученные значения фактического перебора, в целом, согласуются с результатами, описанными в работах [11, 20].

Кроме того, анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что фактические осадки всех рассмотренных зданий не превышают предельно допустимые значения, принимаемые в соответствии с таблицей К.1⁴. Но при заложенном в проект коэффициенте перебора 2,5 % шесть зданий в двухмерной постановке получили дополнительные перемещения, превышающие их предельно допустимые значения, а в трехмерной постановке недопустимые перемещения получили два здания. То есть некор-

⁴ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.

Вертикальные фактические и расчетные деформации зданий
Actual and projected vertical deformations of buildings

Наименование зданий Addresses of buildings	PLAXIS 2D				PLAXIS 3D				Фактическая осадка, мм Actual settlement, mm
	Проект Project values		Обратный расчет Backward calculation		Проект Project values		Обратный расчет Backward calculation		
	Коэффициент перебора, % Excess excavation ratio, %	Осадка, мм Settlement, mm	Коэффициент перебора, % Excess excavation ratio, %	Осадка, мм Settlement, mm	Коэффициент перебора, % Excess excavation ratio, %	Осадка, мм Settlement, mm	Коэффициент перебора, ratio, %	Осадка, мм Settlement, mm	
Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 2 (сечение 2) 2 Bldg, 4A Ryazansky avenue (Section 2)	2,5	73,5	0,5	2,9	2,5	30,0	0,6	2,4	2,9
Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 2 (сечение 3) 2 Bldg, 4A Ryazansky avenue (Section 3)	2,5	54,8	0,7	13,3	2,5	30,0	1,2	12,5	13,0
Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 3 (сечение 3) 3 Bldg, 4A Ryazansky avenue (Section 3)	2,5	46,6	0,3	3,8	2,5	16,8	0,7	3,1	3,0
Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 2 (сечение 4) 2 Bldg, 4A Ryazansky avenue (Section 4)	2,5	38,3	0,2	6,1	2,5	30,0	0,8	5,6	5,9
Рязанский пр-т, д. 4А, стр. 8 (сечение 4) 8 Bldg, 4A Ryazansky avenue (Section 4)	2,5	22,8	0,3	2,2	2,5	16,0	0,6	2,0	2,4
Рязанский пр-т, д. 4 (сечение 5) 4 Ryazansky avenue (Section 5)	2,5	32,8	0,1	3,0	2,5	27,5	0,1	4,3	3,4
Рязанский пр-т, д. 2, стр. 27 (сечение 6) 27 Bldg, 2 Ryazansky avenue (Section 6)	2,5	35,4	0,1	4,5	2,5	33,8	0,1	5,5	3,0
Рязанский пр-т, д. 2, стр. 26 (сечение 7) 26 Bldg, 2 Ryazansky avenue (Section 7)	2,5	34,4	0,7	5,5	2,5	14,8	0,7	5,5	5,4

ректно подобранные коэффициенты перебора грунта при проходке приводят к необходимости разработки дополнительных защитных мероприятий для зданий, получивших большие перемещения, а это, в свою очередь, приводит к увеличению стоимости строительства.

На рис. 6 показан фрагмент разреза А-А* трехмерной модели с изополями вертикальных перемещений грунтового массива, возникающих на этапе завершения сооружения перегонного тоннеля. Сечения на других участках имеют схожий характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численного моделирования и анализ данных геодезического мониторинга показывают, что расчетные дополнительные вертикальные перемещения оснований существующих зданий оказываются в несколько раз выше, чем фактические вертикальные перемещения.

Фактический коэффициент перебора грунта, получаемый обратным расчетом методом последовательных итераций, значительно ниже расчетного коэффициента перебора, закладываемого в проект или принимаемого в соответствии с нормативной документацией. Численное моделирование продемонстрировало, что фактический коэффициент перебора грунта для данного участка строительства варьируется в диапазоне от 0,1 до 1,2 %.

В двухмерной постановке при моделировании коэффициента перебора с учетом требований нормативной документации шесть зданий из семи получили деформации, превышающие их предельно допустимые значения, а в трехмерной постановке — лишь два здания получили недопустимые

перемещения, тогда как реальные осадки всех рассмотренных зданий не превышают их предельно допустимых величин. Следовательно, при проектном коэффициенте перебора требуются меры по защите фундаментов зданий, что приводит к удорожанию строительства и увеличению сроков возведения перегонного тоннеля.

Анализ аналогичной работы по определению фактического коэффициента перебора грунта на другом участке строительства показал результаты, подтверждающие, что проектный коэффициент перебора, принимаемый в соответствии с нормативной документацией или по опыту строительной организации, в несколько раз превышает фактический и приводит к завышенным значениям осадок оснований зданий окружающей застройки.

Таким образом, оптимальным выбором коэффициента перебора грунта на конкретном участке строительства является коэффициент, принятый на основании обратного расчета по уже пройденному участку со схожими инженерно-геологическими условиями, с одинаковым типом применяемого тоннелепроходческого щита и диаметром тоннеля. Однако необходимо провести анализ большего количества численных расчетов с сопоставлением результатов с данными геодезического мониторинга с целью определения и назначения осредненных нормативных коэффициентов перебора грунта при сооружении транспортных тоннелей методом щитовой проходки.

По результатам сравнения результатов расчета в плоской и пространственной постановке показана разница в значениях коэффициента перебора в зависимости от моделирования в 2D- или 3D-постановке, что требует дальнейшего изучения.

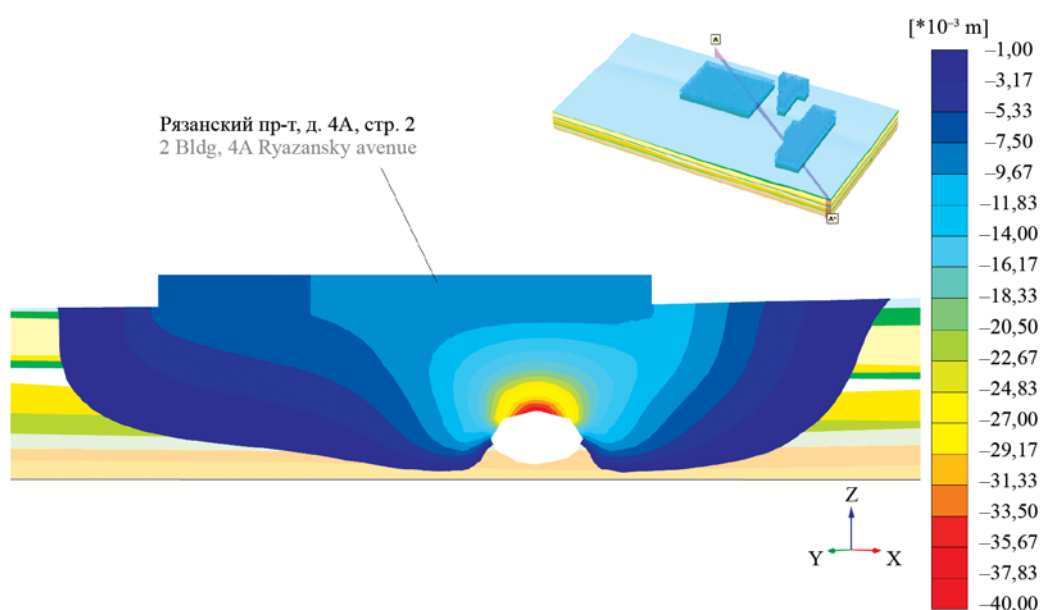


Рис. 6. Фрагмент разреза А-А* изополей вертикальных перемещений массива грунта после проходки тоннеля
Fig. 6. Fragment of section A-A* of the isofields of vertical post-tunneling displacements of the soil mass

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки Горного Института. 2011. № 190. С. 163–171.
2. Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2010. Vol. 47. Issue 3. Pp. 92–95. DOI: 10.1007/s11204-010-9094-4
3. Kim K.Y., Jo S.A., Ryu H.H., Cho G.C. Prediction of TBM performance based on specific energy // Geomechanics and Engineering. 2020. Vol. 22. Issue 6. Pp. 489–496. DOI: 10.12989/gae.2020.22.6.489
4. Li C.Y., Hou S.K., Liu Y.R., Qin P., Yang Q. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 103. P. 103513. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103513
5. Rispoli A., Ferrero A.M., Cardu M. From exploratory tunnel to base tunnel: hard rock TBM performance prediction by means of a Stochastic approach // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. Issue 12. Pp. 5473–5487. DOI: 10.1007/s00603-020-02226-9
6. Sun X.M., Ren C., Yuan J.C., Du J., Guo B. The analysis of time-space effect of surrounding rock deformation of TBM tunnels in deep composite stratum with or without support // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–21. DOI: 10.1155/2020/5494192
7. Hu X.Y., He C., Lai X.H., Walton G., Fu W., Fang Y. A DEM-based study of the disturbance in dry sandy ground caused by EPB shield tunneling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 101. P. 103410. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103410
8. Litsas D., Sitarenios P., Kavvadas M. Parametric investigation of tunnelling-induced ground movement due to geometrical and operational TBM complexities // Italian Geotechnical Journal-Rivista Italiana Di Geotecnica. 2017. Vol. 51. Issue 4. Pp. 22–34. DOI: 10.19199/2017.4.0557-1405.22
9. Zhang M., Li S., Li P. Numerical analysis of ground displacement and segmental stress and influence of yaw excavation loadings for a curved shield tunnel // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 118. P. 103325. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103325
10. Cao L.Q., Zhang D.L., Fang Q., Yu L. Movements of ground and existing structures induced by slurry pressure-balance tunnel boring machine (SPB TBM) tunnelling in clay // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 97. P. 103278. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103278
11. Тер-Мартirosян А.З., Бабушкин Н.Ф., Исаев И.О., Шишкина В.В. Определение фактического коэффициента перебора грунта путем анализа данных мониторинга // Геотехника. 2020. Т. 7. № 1. С. 34–42.
12. Rezaei A.H., Ahmadi-adli M. The volume loss: real estimation and its effect on surface settlements due to excavation of Tabriz Metro tunnel // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. Issue 3. Pp. 2663–2684. DOI: 10.1007/s10706-019-01177-5
13. Rezaei A.H., Shirzeshagh M., Golpasand M.R.B. EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements // Geomechanics and Engineering. 2019. Vol. 19. Issue 2. Pp. 153–165. DOI: 10.12989/gae.2019.19.2.153
14. Fargnoli V., Boldini D., Amorosi A. TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5 // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. Vol. 38. Pp. 336–347. DOI: 10.1016/j.tust.2013.07.015
15. Cheng H.Z., Chen J., Chen G.L. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China // Environmental Earth Sciences. 2019. Vol. 78. Issue 20. DOI: 10.1007/s12665-019-8620-6
16. Nikakhtar L., Zare S., Mirzaei-Nasirabad H. Numerical modelling of backfill grouting approaches in EPB tunneling // Journal of Mining and Environment. 2020. Vol. 11. Issue 1. Pp. 301–314. DOI: 10.22044/jme.2020.9155.1805
17. Zhang C.P., Cai Y., Zhu W.J. Numerical study and field monitoring of the ground deformation induced by large slurry shield tunnelling in sandy cobble ground // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2019/4145721
18. Ding Z.D., Ji X.F., Li X.Q., Wen J.C. Numerical investigation of 3D deformations of existing buildings induced by tunnelling // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. Issue 4. Pp. 2611–2623. DOI: 10.1007/s10706-018-00781-1
19. Тупиков М.М. Особенности деформирования грунтового массива и сооружений при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей в городских условиях : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 185 с.
20. Golpasand M.R.B., Nikudel M.R., Uromeihy A. Specifying the real value of volume loss (V L) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran // Bulletin of Engineering Geology and The Environment. 2016. Vol. 75. Issue 2. Pp. 485–501. DOI: 10.1007/s10064-015-0788-8

Поступила в редакцию 25 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 9 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, исполняющий обязанности директора Института строительства и архитектуры, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 496327; gic-mgsu@mail.ru;

Илья Олегович Исаев — начальник отдела предпроектной проработки; **АО «Мосинжпроект»**; 125252, г. Москва, Ходынский б-р, д. 10; IsaevIO@mosinzhprouekt.ru;

Анастасия Сергеевна Алмакаева — инженер научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; totilas96@mail.ru.

REFERENCES

1. Karasev M.A. Tunnel induced deformation of strata and formation of surface settlement trough during construction process. *Mining Institute Notes*. 2011; 190:163-171. (rus.).
2. Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2010; 47(3):92-95. DOI: 10.1007/s11204-010-9094-4
3. Kim K.Y., Jo S.A., Ryu H.H., Cho G.C. Prediction of TBM performance based on specific energy. *Geomechanics and Engineering*. 2020; 22(6):489-496. DOI: 10.12989/gae.2020.22.6.489
4. Li C.Y., Hou S.K., Liu Y.R., Qin P., Yang Q. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 103:103513. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103513
5. Rispoli A., Ferrero A.M., Cardu M. From exploratory tunnel to base tunnel: hard rock TBM performance prediction by means of a stochastic approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020; 53(12):5473-5487. DOI: 10.1007/s00603-020-02226-9
6. Sun X.M., Ren C., Yuan J.C., Du J., Guo B. The analysis of time-space effect of surrounding rock deformation of TBM tunnels in deep composite stratum with or without support. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-21. DOI: 10.1155/2020/5494192
7. Hu X.Y., He C., Lai X.H., Walton G., Fu W., Fang Y. A DEM-based study of the disturbance in dry sandy ground caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 101:103410. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103410
8. Litsas D., Sitarenios P., Kavvas M. Parametric investigation of tunnelling-induced ground movement due to geometrical and operational TBM complexities. *Italian Geotechnical Journal-Rivista Italiana Di Geotecnica*. 2017; 51(4):22-34. DOI: 10.19199/2017.4.0557-1405.22
9. Zhang M., Li S., Li P. Numerical analysis of ground displacement and segmental stress and influence of yaw excavation loadings for a curved shield tunnel. *Computers and Geotechnics*. 2020; 118:103325. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103325
10. Cao L.Q., Zhang D.L., Fang Q., Yu L. Movements of ground and existing structures induced by slurry pressure-balance tunnel boring machine (SPB TBM) tunnelling in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 97:103278. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103278
11. Ter-Martirosian A.Z., Babushkin N.F., Isaev I.O., Shishkina V.V. Determining the actual ground loss of soil by analyzing monitoring data. *Geotechnics*. 2020; 7(1):34-42. (rus.).
12. Rezaei A.H., Ahmadi-adli M. The volume loss: real estimation and its effect on surface settlements due to excavation of Tabriz Metro tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020; 38(3):2663-2684. DOI: 10.1007/s10706-019-01177-5
13. Rezaei A.H., Shirzehhagh M., Golpas-and M.R.B. EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements. *Geomechanics and Engineering*. 2019; 19(2):153-165. DOI: 10.12989/gae.2019.19.2.153
14. Fagnoli V., Boldini D., Amorosi A. TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013; 38:336-347. DOI: 10.1016/j.tust.2013.07.015
15. Cheng H.Z., Chen J., Chen G.L. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China. *Environmental Earth Sciences*. 2019; 78(20). DOI: 10.1007/s12665-019-8620-6
16. Nikakhtar L., Zare S., Mirzaei-Nasirabad H. Numerical modelling of backfill grouting approaches in EPB tunneling. *Journal of Mining and Environment*. 2020; 11(1):301-314. DOI: 10.22044/jme.2020.9155.1805
17. Zhang C.P., Cai Y., Zhu W.J. Numerical study and field monitoring of the ground deformation induced by large slurry shield tunnelling in sandy cobble ground. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-12. DOI: 10.1155/2019/4145721
18. Ding Z.D., Ji X.F., Li X.Q., Wen J.C. Numerical investigation of 3D deformations of existing buildings induced by tunnelling. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020; 97:103278. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103278

cal Engineering. 2019; 37(4):2611-2623. DOI: 10.1007/s10706-018-00781-1

19. Tupikov M.M. *Features of the deformation of the soil mass and structures during the construction of shallow communication tunnels in urban conditions : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2010; 185. (rus.).

20. Golpasand M.R.B., Nikudel M.R., Uromei-hy A. Specifying the real value of volume loss (V L) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*. 2016; 75(2):485-501. DOI: 10.1007/s10064-015-0788-8

Received November 25, 2020.

Adopted in revised form on December 9, 2020.

Approved for publication on December 9, 2020.

BIONOTES: **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Science in Technics, Acting Director of the Institute of Construction and Architecture, Head of Research and Educational Center “Geotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 496327; gic-mgsu@mail.ru;

Ilya O. Isaev — Head of the Department of Predesign; “**Mosinzhproekt**” JSC; 10 Khodynsky boulevard, Moscow, 125252, Russian Federation; IsaevIO@mosinzhproekt.ru;

Anastasia S. Almakaeva — engineer of Research and Educational Center “Geotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; totilas96@mail.ru.

Исследование деформируемости глинистого грунта во времени

М.Н. Микова, Е.Н. Акбулякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Изучен процесс деформирования глинистого грунта различной консистенции во времени при постоянной нагрузке. В глинистых грунтах процесс консолидации протекает медленно и может длиться годами или десятилетиями. Учет длительных деформаций глинистых грунтов необходим при проектировании и строительстве зданий и сооружений, и для расчета скорости и максимальных значений осадки основания фундамента.

Материалы и методы. Использовались образцы глины полутвердой, тугопластичной, мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции. Изучаемый параметр — относительная и абсолютная деформация образца грунта во времени в зависимости от его консистенции. Все лабораторные испытания проведены в приборах компрессионного сжатия при постоянной нагрузке на образец. Полученные экспериментальные данные были дополнены сведениями М.А. Колтунова.

Результаты. Получены значения абсолютных деформаций и зависимости «время» — «относительная деформация» для глины различной консистенции. Анализ полученных кривых «время» — «относительная деформация» показал, что в зависимости от консистенции глинистого грунта деформации во времени развиваются с различной скоростью. Увеличение значений показателей консистенции глинистого грунта приводило к возрастанию значений начальных деформаций и возрастанию скорости деформации.

Выводы. Полученные уравнения позволяют выполнить расчет деформации глины полутвердой, тугопластичной, мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции для различных диапазонов времени в зависимости от начальной консистенции глины. Достоверность аппроксимации этих уравнений составляет от 0,801 до 0,993, что дает возможность охарактеризовать данные зависимости как математические модели хорошего качества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: консолидация, компрессионное сжатие, глина, деформация, консистенция, ползучесть, осадки основания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Микова М.Н., Акбулякова Е.Н. Исследование деформируемости глинистого грунта во времени // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1654–1662. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1654-1662

A study of clay soil deformability over time

Marina N. Mikova, Evgeniya N. Akbulyakova

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study is focused on the process of clay soil deformation over time, provided that this soil, featuring varied liquidity index values, is exposed to constant load. The consolidation process is slow; it can run for years or decades in clay soils. Long-term deformations of clay soils must be taken into account in the course of design and construction of buildings and structures, on the one hand, and in the process of analyzing settlement rates and maximal settlement values for foundation beds, on the other hand.

Materials and methods. Semi-solid, low-plasticity, high-plasticity, very high plasticity, and free-flowing clay samples were used in the study. The parameters under research encompass relative and absolute deformation of soil samples over time. These parameters are dependent on the soil liquidity index value. All laboratory tests were carried out in compression machines, and tested samples were exposed to constant load. The experimental data thus obtained were supplemented by the information provided M.A. Koltunov.

Results. Values of absolute deformations and time-to-relative deformation ratios were obtained for clays having different liquidity index values. The analysis of the time-to-relative deformation curves shows that deformations develop over time at different rates depending on the liquidity index of clay soils. An increase in the value of the liquidity index boosts the values of initial deformations and deformation rates.

Conclusions. The equations, derived in the course of the study, allow to analyze the deformation of semi-solid, low-plasticity, high-plasticity, very high plasticity, and free-flowing clays for various time ranges depending on the initial clay liquidity index. The accuracy of the approximation of these equations varies from 0.801 to 0.993, which makes it possible to characterize these dependences as high quality mathematical models.

KEYWORDS: consolidation, compression, clay, deformation, liquidity index, creep, foundation bed settlement

FOR CITATION: Mikova M.N., Akbulyakova E.N. A study of clay soil deformability over time. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1654-1662. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1654-1662 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Слабые местные глинистые грунты и высокие эксплуатационные требования к конструкциям, возводимым на таких основаниях, приводят к необходимости учета процесса консолидации грунта при выполнении геотехнических расчетов. Процессы консолидации в глинистых грунтах могут продолжаться длительное время. Мировой опыт показывает, что учет деформаций, развивающихся в процессе консолидации глинистого грунта, позволяет существенно повысить надежность расчетов насыпей и оснований фундаментов [1, 2]. В исследовании [3] было доказано, что осадка свай на вендских глинах возрастает за 16 суток в 2 раза. Поэтому на глинистых основаниях фундаментов зданий и сооружений необходимо прогнозировать длительное взаимодействие фундамента и грунтового основания. Скорость затухания осадки свай зависит от типа глинистого грунта и его показателя консистенции. По данным А.А. Бартоломея «Прогноз осадок свайных фундаментов», краткосрочные осадки одиночной свай не превышают 2–3 мм, а стабилизированные осадки одиночной свай в тугопластичных и твердых глинах составляют примерно 6–12 мм. Если в результате процесса длительной консолидации глинистого грунта основания разность осадок фундамента превысит предельные значения, то в надземных конструкциях здания или сооружения могут возникнуть дополнительные усилия, которые приведут к разрушению элементов конструкций. В работе [4] изучены зависимости между деформациями и временем глинистого грунта в течение заданного промежутка времени. Было выявлено, что в начальный период времени зависимости имеют линейное отношение, но при долгосрочном испытании глинистых грунтов между зависимостями возникает нелинейное отношение. Так же в трудах [5–9] показаны зависимости деформаций глинистых грунтов от времени с учетом консолидации грунта. В работах [10–12] рассмотрены ползучести глинистого грунта текучей консистенции. Многие публикации [13–16] посвящены упрощениям расчетов при определении параметров реологических свойств грунта и расчета осадок оснований. Изучением ползучести глины и упрощения расчета осадок таких оснований занимались многие зарубежные ученые [17–20].

Особый интерес представляет исследование деформирования глинистых грунтов с учетом различных значений показателя текучести, поскольку именно этот параметр во многом определяет скорость и продолжительность развития вертикальных деформаций в глинистых грунтах. Таким образом, проблема прогноза длительных деформаций грунтового основания, представленного глинистыми грунтами, в настоящее время является актуальной.

Согласно М.А. Колтунову «Ползучесть и релаксация», ползучестью называется процесс изме-

нения деформаций тела во времени при постоянном напряжении. Скорость ползучести с течением времени может стать нулевой или конечной величиной, но в некоторых случаях скорость начинает возрастать. Выделяются три типа ползучести: ограниченная, установившаяся и неограниченная, при которой деформации растут до момента разрушения образца.

Ползучесть описывается теорией наследственности Больцмана – Вольтерры:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ — напряжение и деформации в момент наблюдения t при одноосном состоянии; τ — предшествующее моменту t время; E — модуль упругости; $K(t)$ — функция влияния.

Теория наследственной вязкоупругости Больцмана – Вольтерры была предложена для описания процессов деформирования упруговязких материалов, построенная на основе принципа суперпозиции. Математическая запись зависимости напряжений от деформаций имеет вид:

$$\frac{\sigma(t)}{E} = \varepsilon(t) - \sum \varepsilon(t) \Delta T(t-\tau), \quad (2)$$

где σ — напряжения; ε — деформация; E — модуль упругости; $T(t-\tau)$ — функция влияния, убывающая при возрастании $t-\tau$; t — время наблюдения; τ — предшествующее моменту наблюдения время.

При $\sigma(t) = \sigma_k = \text{const}$ уравнение (1) выражается следующим образом:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_k}{E} \left[1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau \right]. \quad (3)$$

После дифференцирования уравнение принимает вид:

$$K(t) = \frac{E}{\sigma_k} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (4)$$

Из уравнения (3) следует, что функция влияния $K(t)$ пропорциональна функции скорости ползучести. Ползучесть включает в себя значения упругой деформации, вязкоупругой и пластической. Модуль упругости определяется при помощи определения упругой части деформации.

Функция при отсутствии пластической составляющей, называемая податливостью материала $\Pi(t)$, равна величине, обратной модулю (5):

$$\Pi(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon_k} = 1/E. \quad (5)$$

Податливость $\Pi(t)$ — функция ползучести. Отношение между функцией $K(t)$ и $\Pi(t)$ представлено формулой:

$$\Pi'(t) = \frac{1}{E} K(t). \quad (6)$$

Наибольшее из значений напряжений σ_k , для которых кривые податливостей $\Pi(t)$ совпадают, называется границей области линейности свойств деформаций. Если напряжения много больше граничных значений, то применение линейных уравнений (3) невозможно. В таких случаях подбирают нелинейную теорию связи напряжения и деформаций во времени.

Данная работа призвана решить вопрос о характере развития длительных деформаций глин различной консистенции. Для достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

- разработана методика лабораторных экспериментов для определения длительных деформаций глин различной консистенции;
- результаты лабораторных экспериментов дополнены результатами теоретических исследований в области развития длительных деформаций материалов;
- предложена методика для прогноза длительных деформаций глинистых грунтов с различными значениями показателя консистенции;
- сформулированы выводы по выполненному исследованию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использовались образцы глины полутвердой, тугопластичной, мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции, отобранные в Пермском крае. Исследуемые глины являются глинами аллювиального происхождения и широко используются в качестве естественных оснований фундаментов зданий и сооружений, а также как грунты земляного полотна и обратной засыпки.

Лабораторные испытания по определению деформируемости образцов глин производились в приборе компрессионного сжатия. Применено устройство компрессионного сжатия (1 т) ГТ 1.1.4-01 в составе измерительно-вычислительного комплекса «АСИС-1» (рис. 1).

Размер испытываемых в приборе образцов — 80,26 см³. Значения некоторых физических характеристик испытываемых образцов приведены в табл. 1.

Компрессионные испытания выполнялись в следующем порядке: на первом этапе установлены характеристики глинистого грунта: плотность (методом режущего кольца), природная влажность (методом высушивания грунта до постоянной массы) и показатели пластичности (определением границы текучести и границы раскатывания). На следующем этапе выполнена подготовка согласно ГОСТ 30416-2012 серии образцов глины для испытаний с заданными значениями влажности и показателя консистенции. Для проведения лабораторного исследования была составлена матрица экспериментов, приведенная в табл. 2.

Нагрузка на образцы глины принята постоянной и равной 200 кПа. Лабораторные испытания образцов грунта выполнены по двум схемам: до условной стабилизации образцов грунта по ГОСТ 12248-2010 и длительные испытания с измерением абсолютных вертикальных деформаций образца.

В результате компрессионных испытаний были получены зависимости абсолютных деформаций образцов глинистого грунта от времени.

Полученные экспериментальные данные проанализированы и дополнены данными М.А. Колтунова «Ползучесть и релаксация». Для этого полученные в ходе лабораторных испытаний зависимости «время» – «относительная деформация», с помощью коэффициента подобия были совмещены с графиками ползучести по М.А. Колтунову.

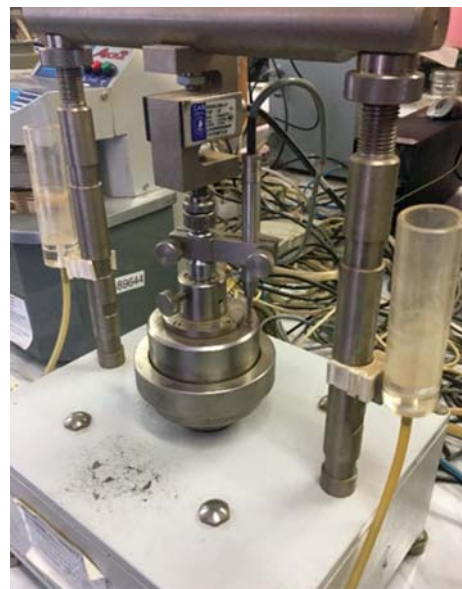


Рис. 1. Проведение лабораторного испытания в приборе компрессионного сжатия

Fig. 1. Laboratory testing performed inside a compression machine

Табл. 1. Средние значения некоторых физических характеристик исследуемых образцов грунта

Table 1. Average values of several physical characteristics of soil samples under research

Показатель текучести, д. ед. Creep, unit fraction	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Влажность, д. ед. Moisture content, unit fraction
0,157	1,938	0,1796
0,375	2,002	0,2410
0,625	2,002	0,2480
0,875	2,003	0,2580
1,150	2,002	0,2640

Табл. 2. Матрица экспериментов**Table 2.** Matrix of experiments

Тип испытываемого грунта Soil type	Схема испытания / Testing pattern	
	Согласно ГОСТ 12248-2010 (до условной стабилизации) Pursuant to GOST 12248-2010 (before conventional stabilization)	С учетом консолидации грунта (длительная) With regard for soil consolidation (long-term)
Глина полутвердая ($I_L = 0,157$) Semi-solid clay ($I_L = 0.157$)	+	+
Глина тугопластичная ($I_L = 0,375$) Low-plasticity clay ($I_L = 0.375$)	+	+
Глина мягкопластичная ($I_L = 0,625$) High-plasticity clay ($I_L = 0.625$)	+	+
Глина текучепластичная ($I_L = 0,875$) Very high plasticity clay ($I_L = 0.875$)	+	+
Глина текучая ($I_L = 1,15$) Free-flowing clay ($I_L = 1.15$)	+	+

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам компрессионных испытаний получены зависимости абсолютных и относительных деформаций образцов глины от времени. Сравнение компрессионных испытаний глины, проведенных до условной стабилизации и проведенных с учетом консолидации, показало, что испытания, выполненные до условной стабилизации, демонстрируют заниженные результаты деформаций образца по отношению к длительным испытаниям. Относительные деформации глинистого грунта полутвердой

консистенции до условной стабилизации составляют 0,058 д. ед. (достигнуты через 24,5 ч — 1,02 дн.), так же при испытании, выполненном с учетом консолидации, относительные деформации равны 0,112 д. ед. (достигнуты через 504 ч — 21 дн). Следовательно, деформации, полученные в результате длительного испытания, значительно превышают деформации, выполненные по стандартной методике в 1,9 раз. Сравнение деформаций с учетом проведения испытания для грунтов различной консистенции отображено в табл. 3.

Табл. 3. Сравнение результатов, полученных по разным схемам испытания**Table 3.** Comparison of test results generated by different testing patterns

Тип испытываемого грунта Soil type	Относительные деформации согласно ГОСТ 12248-2010 (до условной стабилизации) Relative deformations pursuant to GOST 12248-2010 (before conventional stabilization)	Время, дн Time, days	Относительные деформации с учетом консолидации грунта (длительная схема) Relative deformations with regard for soil consolidation (long-term pattern)	Время, дн Time, days	Отношение деформаций, полученных с учетом консолидации, к деформациям, полученным до условной стабилизации Ratio of deformations, obtained with regard for consolidation, to deformations, obtained before conventional stabilization
Глина полутвердая ($I_L = 0,157$) Semi-solid clay ($I_L = 0.157$)	0,0580	1,0	0,1120	21,0	1,90
Глина тугопластичная ($I_L = 0,375$) Low-plasticity clay ($I_L = 0.375$)	0,0930	0,6	0,1190	10,0	1,27
Глина мягкопластичная ($I_L = 0,625$) High-plasticity clay ($I_L = 0.625$)	0,0095	0,5	0,0925	75,0	9,70
Глина текучепластичная ($I_L = 0,875$) Free-flowing clay ($I_L = 0.875$)	0,1195	0,8	0,1275	48,9	1,07

Из табл. 3 видно, что разница деформаций, полученных в результате экспериментов, выполненных до условной стабилизации и длительных, является значимой. Было получено, что относительные деформации глины при длительном испытании превышают деформации грунта при испытании согласно ГОСТ 12248-2010 (до условной стабилизации) в 1,07...9,7 раз. Таким образом, при стандартных испытаниях по ГОСТ до условной стабилизации часть деформаций оказывается неучтенной.

По данным компрессионных испытаний глин построены кривые «время – относительная деформация», которые приведены на рис. 2, и определены уравнения для этих кривых.

Анализ рис. 2 показал, что деформации глинистого грунта в зависимости от его консистенции развиваются с различной скоростью. Была выявлена зависимость показателя текучести глинистого грунта от скорости протекания осадок, т.е. чем больше показатель текучести глинистого грунта, тем быстрее развиваются деформации и тем больше начальная деформация грунта. Кривые, построенные по экспериментальным данным (рис. 2), можно разбить на три участка, характеризующихся различной скоростью изменения относительной деформации грунта во времени. Для каждого из выделенных участков получены уравнения, позволяющие определить относительную деформацию глины в зависимости от заданного момента времени.

Первый участок на кривых характеризует относительную деформацию в начальный момент

времени S_0 . Второй (2 уч.) и третий (3 уч.) участки кривой отображают дальнейшее развитие деформаций, которые затихают со временем (рис. 2). Для образцов глины различной консистенции были получены системы уравнений, приведенные ниже.

Для образца полутвердой глины ($I_L = 0,157$) получена следующая система уравнений (7):

$$\begin{cases} y = 0,0008 \ln(x) - 0,0004, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 4,5 \text{ дн;} \\ y = 4E - 0,6x^2 - 5E - 0,5x + 0,004, \\ \text{при } 4,5 < t \leq 21 \text{ дн.} \end{cases} \quad (7)$$

Для образца тугопластичной глины ($I_L = 0,375$) — система уравнений (8):

$$\begin{cases} y = 0,0006 \ln(x) + 0,0004, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 1 \text{ дн;} \\ y = -3E - 0,7x^2 + 8E - 0,5x + 0,0022, \\ \text{при } 1 < t \leq 9 \text{ дн.} \end{cases} \quad (8)$$

Для образца мягкопластичной глины ($I_L = 0,625$) получена система уравнений (9):

$$\begin{cases} y = 0,0013 \ln(x) + 0,0843, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 34 \text{ дн;} \\ y = -8E - 0,8x^2 + 3E - 0,5x + 0,0902, \\ \text{при } 34 < t \leq 75 \text{ дн.} \end{cases} \quad (9)$$

Для образца текучепластичной глины ($I_L = 0,875$) — система уравнений (10):

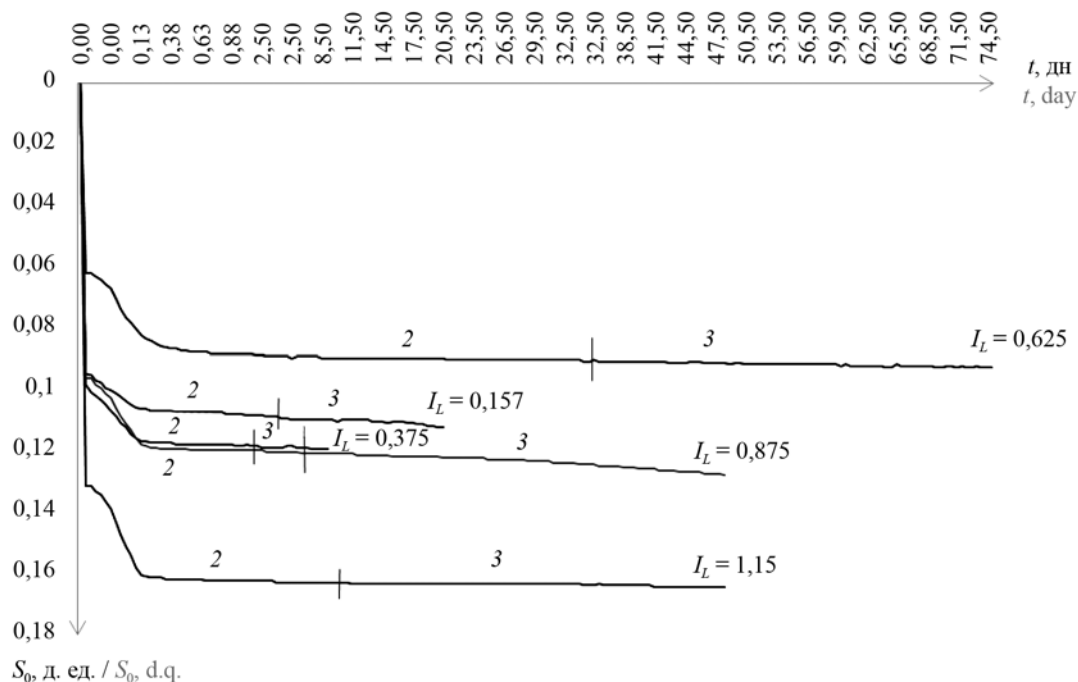


Рис. 2. Зависимости «время – относительная деформация» для образцов глинистого грунта различной консистенции, где 2, 3 — номера участков кривых, для которых получены уравнения

Fig. 2. Time-to-relative deformation dependencies for clay soil samples featuring different liquidity index values, where 2 and 3 are the numbers of curve sections, for which the equations are derived

$$\begin{cases} y = 0,0007 \ln(x) + 0,0002, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 7 \text{ дн;} \\ y = 7E - 0,7x^2 + 2E - 0,5x + 0,003, \\ \text{при } 7 < t \leq 49 \text{ дн.} \end{cases} \quad (10)$$

Для образца текучей глины ($I_L = 1,15$) — система уравнений (11):

$$\begin{cases} y = 0,0007 \ln(x) + 6E - 0,5, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 10 \text{ дн;} \\ y = 4E - 0,7x^2 - 2E - 0,5x + 0,0031, \\ \text{при } 10 < t \leq 48 \text{ дн.} \end{cases} \quad (11)$$

Экспериментальные данные дополнены данными М.А. Колтунова «Ползучесть и релаксация», что позволило определить развитие деформаций глинистого грунта в течение 200 дней. Опытные кривые податливостей $\varepsilon(t)/\sigma(t)$ были совмещены с полученными в ходе лабораторного испытания экспериментальными зависимостями. Таким образом, выявлено, что для описания процесса ползучести следует принять нелинейное соотношение — случай подобия кривых ползучести.

Для каждой полученной в результате опыта кривой определен коэффициент подобия χ_k (12):

$$\chi_k(\sigma_k) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_k)}{\varepsilon(t, \sigma_0)} = \frac{\Psi(\sigma_k)}{\Psi(\sigma_0)}, \quad (12)$$

где χ_k — коэффициент подобия; $\varepsilon(t, \sigma_k)$ — ордината кривой по данным М.А. Колтунова; $\Psi(\sigma_k)$ — ордината кривой, полученной опытным путем; $\varepsilon(t, \sigma_0)$ — ордината кривой по данным М.А. Колтунова при напряжении, равном 0; $\Psi(\sigma_0)$ — ордината кривой, полученной опытным путем, при напряжении, равном 0.

Среди семейства теоретических кривых $\varepsilon_T(t) = f(t)$, где $f(t)$ — подобная функция, следует выражение:

$$\varepsilon(t, \sigma_0) = \chi_0(\sigma_0) \varepsilon_T(t), \quad (13)$$

где $\chi_0(\sigma_0)$ — коэффициент подобия кривых $\varepsilon(t, \sigma_0)$ и $\varepsilon_T(t)$, равный величине вертикального сдвига кривой $\varepsilon(t, \sigma_0)$ для совмещения ее с кривой $\varepsilon_T(t)$.

Для каждой экспериментальной кривой был определен коэффициент подобия. В зависимости от консистенции грунта для каждой кривой опре-

делены числовые параметры функции влияния α , β , A , с помощью которых были установлены дополнительные данные. Для исследуемого глинистого грунта $\alpha = 0,025$, $\beta = 0,05$. Параметр A менялся в зависимости от консистенции глинистого грунта. Полученный коэффициент подобия и числовые параметры сведены в табл. 4.

По полученным значениям параметров функции влияния α , β , A (табл. 3) выявленные в исследовании экспериментальные зависимости были дополнены уравнениями, описывающими $\int_0^t K d\tau$,

где $K(t)$ — функция скорости ползучести по М.А. Колтунову «Ползучесть и релаксация».

Для образца полутвердой глины ($I_L = 0,157$) получено следующее уравнение (14):

$$y = -2E - 0,5x^2 + 0,0003x + 0,1165, \quad (14)$$

при $21 < t \leq 200$ дн.

Для образца тугопластичной глины ($I_L = 0,375$) — уравнение (15):

$$y = -2E - 0,5x^2 + 0,0005x + 0,1259, \quad (15)$$

при $9 < t \leq 200$ дн.

Для образца мягкопластичной глины ($I_L = 0,625$) — уравнение (16):

$$y = -2E - 0,6x^2 - 3E - 0,6x + 0,0962, \quad (16)$$

при $34 < t \leq 200$ дн.

Для образца текучепластичной глины ($I_L = 0,875$) — уравнение (17):

$$y = -6E - 0,6x^2 + 6E - 0,5x + 0,1296, \quad (17)$$

при $49 < t \leq 200$ дн.

Для образца текучей глины ($I_L = 1,15$) — уравнение (18):

$$y = -8E - 0,6x^2 + 9E - 0,5x + 0,1757, \quad (18)$$

при $48 < t \leq 200$ дн.

Таким образом, полученные в данном исследовании уравнения (7)–(11), (14)–(18) позволяют выполнить расчет деформации глины для времени от 3 ч до 200 дней в зависимости от начальной консистенции испытываемой глины. Достоверность

Табл. 4. Числовые параметры для определения функций влияния в зависимости от консистенции глинистого грунта
Table 4. Numerical parameters designated for the identification of influence functions depending on the liquidity index of clay soil

Тип испытываемого грунта Soil type	Коэффициент подобия, χ_k Similarity coefficient, χ_k	α	β	A
Глина тугопластичная / Low-plasticity clay	0,2587	0,025	0,05	0,0074
Глина мягкопластичная / High-plasticity clay	0,284			0,0074
Глина текучепластичная / Very high plasticity clay	0,2118			0,0074
Глина текучая / Free-flowing clay	0,3894			0,0059
Глина тугопластичная / Low-plasticity clay	0,528			0,0059

аппроксимации полученных уравнений составляет 0,801–0,993, что дает возможность их охарактеризовать как математические модели хорошего качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов, полученных с использованием различных схем компрессионных испытаний по ГОСТ 12248-2010 (до условной стабилизации) и с учетом консолидации грунта (длительные испытания), показало, что при выполнении стандартных компрессионных испытаний до достижения условной стабилизации грунта значительная часть вертикальных деформаций не учитывается. В ходе лабораторных испытаний было получено, что относительные деформации глины по результатам длительного испытания превышают в 1,07...9,7 раз деформации глины по результатам испытания до условной стабилизации.

Анализ экспериментальных данных деформируемости глины Пермского края и теоретических исследований позволил получить уравнения зависимости деформаций глины от времени. В зависимости от консистенции глинистого грунта деформации

во времени изменяются с различной скоростью. Выявлена следующая зависимость — при увеличении значений показателей консистенции глины происходит возрастание начальных деформаций и возрастание скорости деформаций грунта.

Полученные в данном исследовании уравнения позволяют выполнить расчет деформации глины для времени от 3 ч до 200 дней в зависимости от заданной консистенции испытываемой глины и ее начальной деформации. Достоверность аппроксимации представленных уравнений составляет от 0,801 до 0,993, что дает возможность охарактеризовать полученные уравнения как математические модели хорошего качества.

По мнению авторов, продолжение экспериментальных исследований в области длительного деформирования глинистых грунтов будет служить основой для усовершенствования методики расчета длительных осадок насыпей и оснований фундаментов зданий и сооружений. Поэтому необходимо продолжать исследования в области консолидации глинистого грунта для уточнения существующих методов расчета осадки оснований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Консолидация водонасыщенного грунта при действии циклической нагрузки // Вестник МСГУ. 2010. № 4–2. С. 194–197.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Нгуен Х.Х. Консолидация и ползучесть оснований фундаментов конечной ширины // Вестник МСГУ. 2013. № 4. С. 38–51. DOI: 10.22227/1997-0935. 2013. 4.38-52
3. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 202–244.
4. Feng W.-Q., Lalit B., Yin Z.-Y., Yin J.H. Long-term Non-linear creep and swelling behavior of Hong Kong marine deposits in oedometer condition // Computers and Geotechnics. 2017. Vol. 84. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.009
5. Hu W., Yin Z.-Y., Scaringi G, Dano C., Hicher P.-Y. Relating fragmentation, plastic work and critical state in crushable rock clasts // Engineering Geology. 2018. Vol. 246. Pp. 326–336. DOI: 10.1016/j.enggeo. 2018.10.012
6. Сычкина Е.Н., Офрехтер Я.В., Антипов В.В. Прогноз длительной осадки свай на песчаниках и аргиллитоподобных глинах пермского возраста // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 5–13. DOI: 10.15593/2224-9826/ 2019.2.01
7. Sychkina E.N. Forecast of settlement of single pile based on hereditary creep // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. P. 044033. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044033
8. Wong R.C.K., Varatharajan S. Viscous behaviour of clays in one-dimensional compression // Canadian Geotechnical Journal. 2014. Vol. 51. Issue 7. Pp. 795–809. DOI: 10.1139/cgj-2013-0198
9. Xia C.G., Hu A.F., Cui J., Lu W.-X. Analytical solutions for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated soft layered soils // Rock and Soil Mechanics. 2018. Vol. 39. Issue 8. Pp. 2858–2864. DOI: 10.16285/j. rsm.2016.2500
10. Oliveira P.J.V., Correia A.A.S., Mira E.S.P. Mitigation of creep deformations by preloading: laboratory study // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 166. Issue 6. Pp. 594–600. DOI: 10.1680/geng.11.00056
11. Oliveira P.J.V., Correia A.A.S., Lemos L.J.L. Numerical prediction of the creep behaviour of an unstabilised and a chemically stabilised soft soil // Computers and Geotechnics. 2017. Vol. 87. Pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.006
12. Oliveira P.J.V., Santos S.L., Correia A.A.S., Lemos L.J.L. Numerical prediction of the creep behaviour of an embankment built on soft soils subjected to preloading // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 114. P. 103140. DOI: 10.1016/j.compgeo. 2019.103140

13. Sivasithamparam N., Karstunen M., Bonnier P. Modelling creep behaviour of anisotropic soft soils // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 69. Pp. 46–57. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.04.015
14. Zhao D., Gao Q.F., Hattab M., Hicher P.Y., Yin Z.Y. Microstructural evolution of remolded clay related to creep // *Transportation Geotechnics*. 2020. Vol. 24. P. 100367. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100367
15. Zhao D., Hattab M., Yin Z.Y., Hicher P.Y. Dilative behavior of kaolinite under drained creep condition // *Acta Geotechnica*. 2019. Vol. 14. Issue 4. Pp. 1003–1019. DOI: 10.1007/s11440-018-0686-x
16. Xie X., Qi S., Zhao F., Wang D. Creep behavior and the microstructural evolution of loess-like soil from Xi'an area, China // *Engineering Geology*. 2018. Vol. 236. Pp. 43–59. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.11.003
17. Xu X.B., Cui Z.D. Investigation of a fractional derivative creep model of clay and its numerical implementation // *Computers and Geotechnics*. 2020. Vol. 119. P. 103387. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103387
18. Feng W.Q., Yin J.H., Chen W.B., Tan D.Y., Wu P.C. A new simplified method for calculating consolidation settlement of multi-layer soft soils with creep under multi-stage ramp loading // *Engineering Geology*. 2020. Vol. 264. P. 105322. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105322
19. Zhou W.H., Tan F., Yuen K.V. Model updating and uncertainty analysis for creep behavior of soft soil // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 100. Pp. 135–143. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.04.006
20. Wu P.C., Feng W.Q., Yin J.H. Numerical study of creep effects on settlements and load transfer mechanisms of soft soil improved by deep cement mixed soil columns under embankment load // *Geotextiles and Geomembranes*. 2020. Vol. 48. Issue 3. Pp. 331–348. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.12.005

Поступила в редакцию 30 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 10 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 10 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Марина Николаевна Микова** — магистрант кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ);** 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; mikovamarina30@gmail.com;

Евгения Николаевна Акбулякова — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ);** 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 655291, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru.

REFERENCES

1. Ter-Martirosjan Z.G., Ter-Martirosjan A.Z. Consolidation of water-saturated soil under cyclic loading. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-2:194-197. (rus.).
2. Ter-Martirosjan Z.G., Ter-Martirosjan A.Z., Nguyen H.H. Consolidation and creep of foundations of finite widths. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 4:38-51. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.4.38-52 (rus.).
3. Shulyatiev O.A. Foundations of high-rise buildings. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2014; 4:202-244. (rus.).
4. Feng W.-Q., Lalit B., Yin Z.-Y., Yin J.H. Long-term Non-linear creep and swelling behavior of Hong Kong marine deposits in oedometer condition. *Computers and Geotechnics*. 2017; 84:1-15. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.009
5. Hu W., Yin Z.-Y., Scaringi G., Dano C., Hicher P.-Y. Relating fragmentation, plastic work and critical state in crushable rock clasts. *Engineering Geology*. 2018; 246:326-336. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.012
6. Sychkina E.N., Ofrihter Ja.V., Antipov V.V. The forecast of long-term settlement of the pile on sandstones and claystones of the Permian age. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2019; 10(2):5-13. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.01 (rus.).
7. Sychkina E.N. Forecast of settlement of single pile based on hereditary creep. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 687:044033. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044033
8. Wong R.C.K., Varadarajan S. Viscous behaviour of clays in one-dimensional compression. *Canadian Geotechnical Journal*. 2014; 51(7):795-809. DOI: 10.1139/cgj-2013-0198
9. Xia C.G., Hu A.F., Cui J., Lu W.-X. Analytical solutions for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated soft layered soils. *Rock and Soil Mechanics*. 2018; 39(8):2858-2864. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2500
10. Oliveira P.J.V., Correia A.A.S., Mira E.S.P. Mitigation of creep deformations by preloading: labora-

tory study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2013; 166(6):594-600. DOI: 10.1680/jeng.11.00056

11. Oliveira P.J.V., Correia A.A.S., Lemos L.J.L. Numerical prediction of the creep behaviour of an unstabilised and a chemically stabilised soft soil. *Computers and Geotechnics*. 2017; 87:20-31. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.006

12. Oliveira P.J.V., Santos S.L., Correia A.A.S., Lemos L.J.L. Numerical prediction of the creep behaviour of an embankment built on soft soils subjected to preloading. *Computers and Geotechnics*. 2019; 114:103140. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103140

13. Sivasithamparam N., Karstunen M., Bonnier P. Modelling creep behaviour of anisotropic soft soils. *Computers and Geotechnics*. 2015; 69:46-57. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.04.015

14. Zhao D., Gao Q.F., Hattab M., Hicher P.Y., Yin Z.Y. Microstructural evolution of remolded clay related to creep. *Transportation Geotechnics*. 2020; 24:100367. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100367

15. Zhao D., Hattab M., Yin Z.Y., Hicher P.Y. Dilative behavior of kaolinite under drained creep condition. *Acta Geotechnica*. 2019; 14(4):1003-1019. DOI: 10.1007/s11440-018-0686-x

16. Xie X., Qi S., Zhao F., Wang D. Creep behavior and the microstructural evolution of loess-like soil from Xi'an area, China. *Engineering Geology*. 2018; 236:43-59. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.11.003

17. Xu X.B., Cui Z.D. Investigation of a fractional derivative creep model of clay and its numerical implementation. *Computers and Geotechnics*. 2020; 119:103387. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103387

18. Feng W.Q., Yin J.H., Chen W.B., Tan D.Y., Wu P.C. A new simplified method for calculating consolidation settlement of multi-layer soft soils with creep under multi-stage ramp loading. *Engineering Geology*. 2020; 264:105322. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105322

19. Zhou W.H., Tan F., Yuen K.V. Model updating and uncertainty analysis for creep behavior of soft soil. *Computers and Geotechnics*. 2018; 100:135-143. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.04.006

20. Wu P.C., Feng W.Q., Yin J.H. Numerical study of creep effects on settlements and load transfer mechanisms of soft soil improved by deep cement mixed soil columns under embankment load. *Geotextiles and Geomembranes*. 2020; 48(3):331-348. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.12.005

Received November 30, 2020.

Adopted in revised form on December 10, 2020.

Approved for publication on December 10, 2020.

B I O N O T E S: **Marina N. Mikova** — master student of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; mikovamarina30@gmail.com;

Evgeniya N. Akbulayakova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; ID RISC: 655291, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru.

К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой

И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наряду с известными достоинствами — высокая прочность на разрыв, малый удельный вес, высокая коррозионная стойкость и низкая теплопроводность, у арматуры композитной полимерной существует ряд особенностей, недостатков. Одним из главных является относительно низкий по сравнению со сталью модуль упругости, в результате чего элементы с композитной арматурой обладают более высокой деформативностью. В связи с этим требования второй группы предельных состояний, предъявляемые к конструкциям, могут стать основным препятствием для использования композитов в качестве армирования бетонных элементов. Предполагается, что характер трещинообразования у элементов с композитной арматурой может отличаться от традиционных железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования с учетом и соблюдением положений ГОСТ 8829-94. Опытные образцы — бетонные балки сечением 120 × 220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне. В качестве армирования использовались стержни стальной, стеклокомпозитной и базальтокомпозитной арматуры. Варьировалась величина процента армирования. Рассмотрены методики расчета ширины раскрытия трещин нормативных документов: России — СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017, США — ACI 440.1R-06.

Результаты. Получены результаты теоретических и экспериментальных исследований трещиностойкости изгибаемых элементов, армированных композитной полимерной арматурой. Выявлены различия в рассмотренных методиках расчета.

Выводы. Зафиксированы особенности трещинообразования у элементов с композитной арматурой, которые ставят под сомнение возможность использования методик СП. Методики СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017 имеют отличия в расчете значений ширины раскрытия трещин, что приводит к различным результатам расчета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неметаллическая арматура, композитная полимерная арматура, бетонные конструкции, изгибаемые элементы, ширина раскрытия трещин, бетонная балка, стеклокомпозитная арматура, базальтокомпозитная арматура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1663–1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672

The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars

Ilshat T. Mirsayapov, Igor A. Antakov, Alexey B. Antakov

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Rebars, made of fiber-reinforced polymers (FRP), have a number of distinguishing characteristics and disadvantages along with well-known strengths, such as high tensile strength, low specific density, high corrosion resistance, and low thermal conductivity. One of its principal strengths is the modulus of elasticity which is relatively low compared to steel. As a result, elements, having FRP reinforcement, feature higher deformability. In this regard, the requirements of serviceability limit states, applicable to structures, may become the main obstacle to the use of FRP as the reinforcement for concrete members. It is assumed that cracking patterns of members, having FRP reinforcement, may differ from those of traditional reinforced concrete structures.

Materials and methods. Experimental studies were carried with regard for and in compliance with the provisions of National State Standard 8829-94. Tested samples represented concrete beams that were 1,810 mm long and had a cross section of 120 × 220 mm. Their tensile side was reinforced with two bars. Steel, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) and basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars were used to reinforce the beams. The value of the reinforcement ratio varied. Crack width calculation methods, applied according to Construction rules and regulations 63.13330.2012 and 295.1325800.2017 (Russia) and ACI 440.1R-06 (USA) were analyzed.

Results. The results of the theoretical and experimental studies of the crack resistance of flexural members having FRP reinforcement are obtained. Discrepancies between the calculation methods are identified.

Conclusions. Cracking patterns, typical for members having FRP reinforcement, are specified. They contest the applicability of methods, prescribed in the Construction Rules and Regulations. The methods, prescribed by Construction Rules and

Regulations 63.13330.2012 and 295.1325800.2017, differ in respect of crack width calculations, and it leads to diverging calculation results.

KEYWORDS: non-metallic reinforcement, fiber-reinforced polymer reinforcement, concrete structures, flexural members, crack width, concrete beam, glass fiber-reinforced polymer reinforcement, basalt fiber-reinforced polymer reinforcement

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

ВВЕДЕНИЕ

Арматура композитная полимерная (далее — АКП) имеет некоторые преимущества перед металлической: большее — до 3,5 раз сопротивление растяжению, малый удельный вес, высокая коррозионная стойкость, низкая теплопроводность. При этом деформационные свойства АКП также существенно отличаются: до четырех раз более низкий модуль упругости, диаграмма «напряжения — деформации» при кратковременном нагружении практически прямолинейна вплоть до разрушения.

Исследования российских и зарубежных ученых выявили ряд особенностей работы изгибаемых бетонных элементов с АКП под нагрузкой:

- сначала растяжению подвергаются наружные волокна арматуры, в дальнейшем в работу вступают внутренние [1];
- диаграммы для балок «изгибающий момент — прогиб» под нагрузкой характеризуются преимущественно билинейными зависимостями с двумя фазами работы изгибаемого элемента — без трещин и с трещинами [2–8]. При этом значения прогибов в 3–4 раза выше, чем у железобетонных аналогов, и соответственно больше ширина раскрытия трещин [9–15];
- сжатая зона в нормальном сечении значительно, по сравнению с железобетонными элементами, уменьшается после появления трещин и затем остается практически постоянной вплоть до разрушения элемента [16];
- разрушение нормального сечения носит хрупкий характер с реализацией двух механизмов — от разрыва растянутой арматуры и от разрушения бетона в сжатой зоне [3, 4, 6, 10, 11, 15, 17]. Также возможно одновременное разрушение по бетону и арматуре [18]. Вследствие низкого модуля упругости АКП при проценте армирования ниже определенного уровня возможно разрушение балок по бетону, при нагрузках менее проектных величин [19];
- из-за относительно высокой подверженности АКП ползучести при длительном приложении нагрузки прогибы изгибаемых элементов увеличиваются до 90 % от первоначальных значений, в зависимости от величины нагрузки и вида арматуры. При этом с течением времени возможно образование трещин [20]. В зависимости от вида АКП предельная прочность при длительной нагрузке составляет порядка 20–65 % от прочности при кратковременной нагрузке [21, 22];

• из-за относительно низкого модуля упругости композитов требования к прогибам и ширине раскрытия трещин могут быть основными при проектировании конструкций с АКП [10]. Необходимо совершенствование существующих методик расчета прогибов и ширины раскрытия трещин изгибаемых элементов с АКП [6, 15, 23–26]. Наиболее значимыми переменными при расчете по второй группе предельных состояний являются процент армирования и модуль упругости АКП [6];

• у балок с АКП образуется больше трещин, чем у железобетонных аналогов [13]. При увеличении процента армирования расстояние между трещинами и их ширина уменьшаются [14, 27];

• в ранее проведенном исследовании [28, 29] установлено, что предельные состояния по эксплуатационной пригодности балок с АКП наступают при 26,1–52,9 % от разрушающих нагрузок, у балок с преднапряженной композитной арматурой — 42,3–70,3 %. Более эффективно использование стержней меньшего диаметра.

Работа изгибаемых элементов с АКП под нагрузкой имеет ряд принципиально иных от железобетона особенностей, что является следствием физико-механических свойств композитной арматуры. Исследование деформационных свойств конструкций с АКП и достоверность их теоретической оценки в существующих методиках расчета — актуальные вопросы.

В России в 2015 г. было внесено Изменение № 1 к СП 63.13330.2012, которое включало в себя Приложение Л с рекомендациями по расчету и конструированию конструкций с композитной полимерной арматурой. В 2017 г. был выпущен СП 295.1325800.2017, который полностью посвящен проектированию конструкций с АКП. В 2019 г. введен в действие СП 63.13330.2018, в котором Приложение с рекомендациями по проектированию конструкций с АКП отсутствует.

Таким образом, в Российской Федерации действовало два нормативных документа, в которых представлены методики расчета конструкций с АКП, — это СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017. Методики расчета базируются на существующих подходах для железобетонных конструкций. Методики идентичны, за исключением расчета ширины раскрытия трещин.

В обоих документах ширину раскрытия трещин определяют по формуле:

$$a_{cr,i} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_f \frac{\sigma_f}{E_f} l_f. \quad (1)$$

В отличие от расчета железобетонных элементов, предельные величины ширины раскрытия трещин увеличены до 0,7 мм — при непродолжительном раскрытии трещин и 0,5 мм — при продолжительном. Увеличены значения коэффициента φ_2 , учитывающего профиль продольной АКП, до 0,7 для арматуры периодического профиля и 1,2 для гладкой. Сжатая арматура в расчетах не учитывается.

В методиках различно определяется базовое расстояние между трещинами l_f . Согласно п. Л.3.4 СП 63.13330.2012 расчеты по второй группе предельных состояний выполняются по методике расчета железобетонных элементов при использовании характеристик композитной арматуры. То есть l_f определяется по формуле (2) и принимается не менее $10d_s$ и 10 см, и не более $40d_s$ и 40 см:

$$l_f = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_f} d_s. \quad (2)$$

В п. 6.2.16 СП 295.1325800.2017 l_f определяется по формуле (3) и принимается не менее $10d_s$ и 10 см, и не более $20d_s$ и 20 см:

$$l_f = 0,25 \frac{A_{bt}}{A_f} d_s. \quad (3)$$

В отличие от СП 63.13330.2012 в СП 295.1325800.2017 расчетное значение l_f и предельное значение уменьшены в 2 раза.

Для сравнения рассмотрим аналогичное выражение в методике ACI 440.1R-06:

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

где f_f — напряжение в арматуре; E_f — модуль упругости АКП; β — отношение расстояния между нейтральной осью и растянутой гранью к расстоянию между нейтральной осью и центром тяжести арматуры; k_b — коэффициент, который учитывает степень сцепления между АКП и бетоном; d_c — толщина защитного слоя бетона от растянутой грани

до центра ближайшего стержня; s — расстояние между арматурными стержнями.

Введение коэффициента k_b и его величины обосновывается проведенным авторами ACI 440.1R-06 анализом различных экспериментальных исследований сцепления АКП с бетоном. Сцепление композитной арматуры с бетоном может существенно отличаться от сцепления стальной арматуры. Поэтому для стержней АКП, имеющих сцепление с бетоном, аналогичное стальным стержням, коэффициент k_b принимается равным 1. Если величина сцепления АКП с бетоном ниже, чем у стальных стержней, k_b принимается больше 1,0; если выше — меньше 1,0. В зависимости от вида волокна, связующего и типа поверхности отношение сцепления АКП к стальной арматуре колеблется в пределах от 0,6 до 1,72. В случае, когда значение k_b неизвестно из экспериментальных данных, его следует принимать равным 1,4. Таким образом, данный коэффициент в отличие от коэффициента φ_2 методики СП не является постоянной величиной. В методике ACI 440.1R-06 расстояние между трещинами не учитывается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью получения опытных данных о работе изгибаемых элементов с композитной арматурой авторами на базе Казанского государственного архитектурно-строительного университета проведены экспериментальные исследования образцов балок с стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной (АБК) арматурой.

Опытные образцы — бетонные балки сечением 120×220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне, с защитным слоем бетона 20 мм. Испытания балок проводились в соответствии с положениями ГОСТ 8829-94. Балки свободно оперты по двум сторонам и нагружены сосредоточенными нагрузками на расстоянии $L/3$ с каждой стороны от опор (рис. 1), где L — расстояние между опорами.

В табл. 1 представлены характеристики опытных образцов балок. В рамках исследования ис-

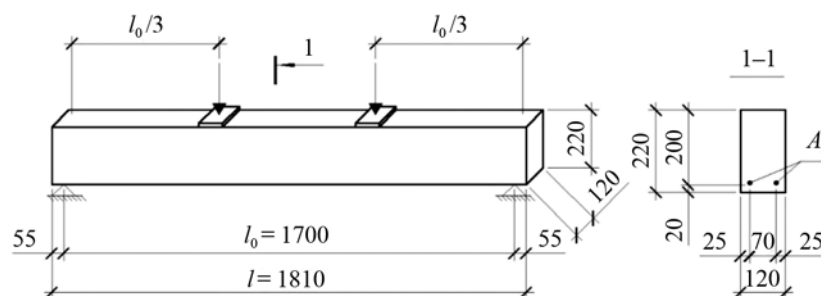


Рис. 1. Схема опирания и нагружения исследуемых балок
Fig. 1. Beam support and loading pattern

Табл. 1. Характеристики серий опытных образцов балок

Table 1. Characteristics of series of beam specimens

Номер серии Series no.	Класс бетона Concrete strength class	Продольное армирование / Longitudinal reinforcement				
		Количество и диаметр стержней, класс Number and diameter of bars, type	Расчетный диаметр, мм Design diameter, mm	Процент армирования μ , % Reinforcement ratio μ , %	Модуль упругости $E_{s(f)}$, МПа Modulus of elasticity $E_{s(f)}$, MPa	Сопротивление растяжению $R_{s(f)n}$, МПа Ultimate tensile strength $R_{s(f)n}$, MPa
1	B30 C25/30	2 Ø12 A400	12	0,942	200 000	400
		2 Ø8 A400	8	0,421		
		2 Ø6 A400	6	0,238		
2	B40 C30/37	2 Ø10 ACK 2 Ø10 GFRP	8,6	0,484	51 500	1200
		2 Ø8 ACK 2 Ø8 GFRP	7	0,321	51 500	1200
		2 Ø6 ACK 2 Ø6 GFRP	5	0,164	51 770	1250
3	B35 C30/37	2 Ø7 АБК 2 Ø7 BFRP	7	0,321	50 000	1000
		2 Ø5 АБК 2 Ø5 BFRP	5,3	0,184	51 000	1100
		2 Ø4 АБК 2 Ø4 BFRP	4	0,105	51 000	1200

пользованы следующие виды АКП: серия 2 — стержни АСК периодического профиля, рифление создано при помощи навивки базальтового волокна по ТУ 5769-248-35354501-2007; серия 3 — стержни АБК с опесчанной поверхностью по ТУ 2296-001-60722703-2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 2 приведены экспериментальные значения изгибающих моментов при ширине раскрытия трещин, равной предельно допустимой величине 0,7 мм, и соответствующие им теоретические данные по ширине раскрытия трещин и расстоянию между трещинами. В расчетах по методикам СП коэффициент ψ_f определялся по формуле $\psi_f = 1 - 0,8 \frac{M_{cre}}{M}$. В величинах l_f первое число использовалось в расчете a_{cre} , во всех расчетах является предельным значение $40d_s$ и $20d_s$ соответственно методикам СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017. В скобках указано значение, определенное по формулам (2) и (3), во всех случаях оно больше предельной величины. Как и можно было предположить, величина l_f оказала существенное влияние на ширину раскрытия трещин: в методике СП 295.1325800.2017 она в 2 раза меньше, чем в СП 63.13330.2012. В результате теоретические данные по ширине раскрытия трещин у всех балок по методике СП 295.1325800.2017 являются заниженными относительно экспериментальных.

Отклонение теоретических данных ширины раскрытия трещин по методике СП 63.13330.2012 от величины 0,7 мм достигает 58,4 %, у методики СП 295.1325800.2017 — 79,4 %, у методики АСІ 440.1R-06 — 32,8 % (не учтены балки, в которых согласно теоретическим данным трещины не образуются). Однако стоит отметить, что у ряда типов балок — относительно высокий разброс между опытными данными.

Для оценки достоверности определенных расстояний между трещинами l_f рассмотрим схемы развития трещин для исследуемых балок. Для выявления особенностей трещинообразования у элементов с АКП на рис. 2 выполнено сравнение балок, армированных двумя стержнями диаметром 6 мм А400 и двумя стержнями диаметром 6 мм АСК, у которых близкие результаты по разрушающему усилию и моменту трещинообразования.

В связи с относительно большей деформативностью высота развития трещин у образцов с АКП выше, чем у железобетонных балок, и остается практически постоянной вплоть до разрушения элемента. Также стоит отметить, что у балок с АКП наблюдалось «разветвление» трещин, подобное явление у железобетонных балок происходило в момент достижения напряжений в арматуре предела текучести. Предполагаемой причиной «разветвления» трещин является относительно низкий модуль упругости АКП. Деформации, при которых происходит данное явление, у железобетонных балок наступают только после достижения в арматуре предела текучести.

Табл. 2. Результаты исследования балок — опытные изгибающие моменты M при ширине раскрытия трещин $a_{cr} = 0,7$ мм и соответствующие теоретические данные по ширине раскрытия трещин и расстоянию между трещинами
Table 2. Findings of the beam studies, including experimental bending moments M at crack width $a_{cr} = 0.7$ mm and corresponding theoretical data on crack width and crack spacing

Номер серии Series no.	Армирование балки Beam reinforcement	Экспериментальные данные Experimental data		Теоретические данные Theoretical data				
		Изгибающий момент при $a_{cr} = 0,7$ мм M , кН·м Bending moment at $a_{cr} = 0.7$ mm M , кН·м	Среднее значение M , кН·м Mean value M , кН·м	СП 63.13330.2012 Construction rules and regulations 63.13330.2012		СП 295.1325800.2017 Construction rules and regulations 295.1325800.2017		ACI 440.1R-06
				a_{cr} , мм a_{cr} , mm	l_f , мм l_f , mm	a_{cr} , мм a_{cr} , mm	l_f , мм l_f , mm	
2	2 Ø10 ACK 2 Ø10 GFRP	5,684–9,412	7,548	0,902	344 (437,7)	0,447	172 (218,8)	0,662
	2 Ø8 ACK 2 Ø8 GFRP	7,094–4,968	6,031	0,695	280 (538,7)	0,345	140 (269,3)	0,787
	2 Ø6 ACK 2 Ø6 GFRP	3,519–3,423	3,471	—	200 (755,4)	—	100 (377,7)	0,87
3	2 Ø7 АБК 2 Ø7 BFRP	7,448–4,128	5,788	0,717	280 (538,5)	0,355	140 (269,3)	0,779
	2 Ø5 АБК 2 Ø5 BFRP	3,99	3,99	0,291	212 (712,4)	0,144	106 (356,2)	0,906
	2 Ø4 АБК 2 Ø4 BFRP	2,64	2,64	—	160 (944,8)	—	80 (472,39)	1,042

Примечание: «—» — согласно теоретическим данным трещины не образуются.

Note: “—” means no cracking according to the theoretical data.

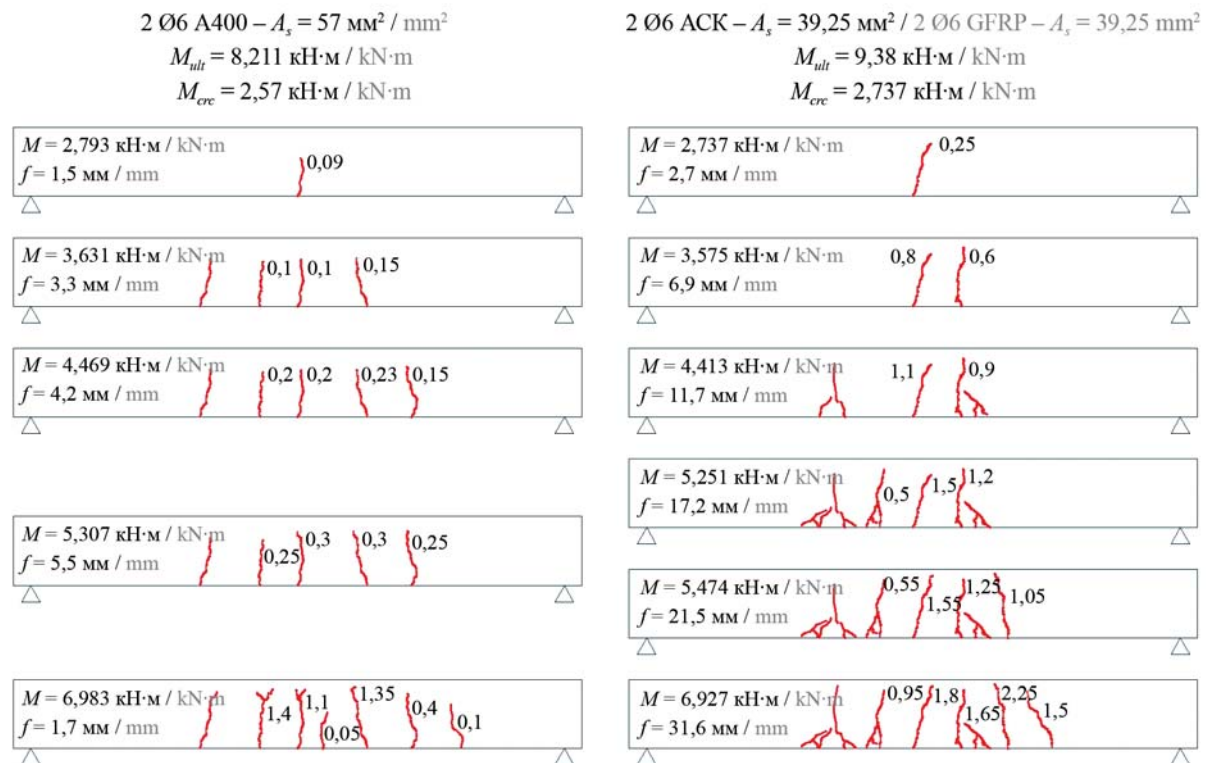


Рис. 2. Характерные стадии развития трещин у балок, армированных двумя стержнями 2 Ø6 A400 и 2 Ø6 ACK
Fig. 2. Typical cracking patterns of beams reinforced with two 2 Ø6 A400 and 2 Ø6 GFRP bars

На рис. 3 показаны схемы развития трещин для балок, армированных 2 Ø8 АСК и 2 Ø10 АСК, на рис. 4 — для балок, армированных 2 Ø7 АБК, 2 Ø5 АБК и 2 Ø4 АБК.

Анализируя схемы развития трещин, изображенные на рис. 2 и 3, можно прийти к выводу, что при одинаковых величинах нагрузки высота сжатой зоны бетона у балок с АКП ниже, чем у железобе-

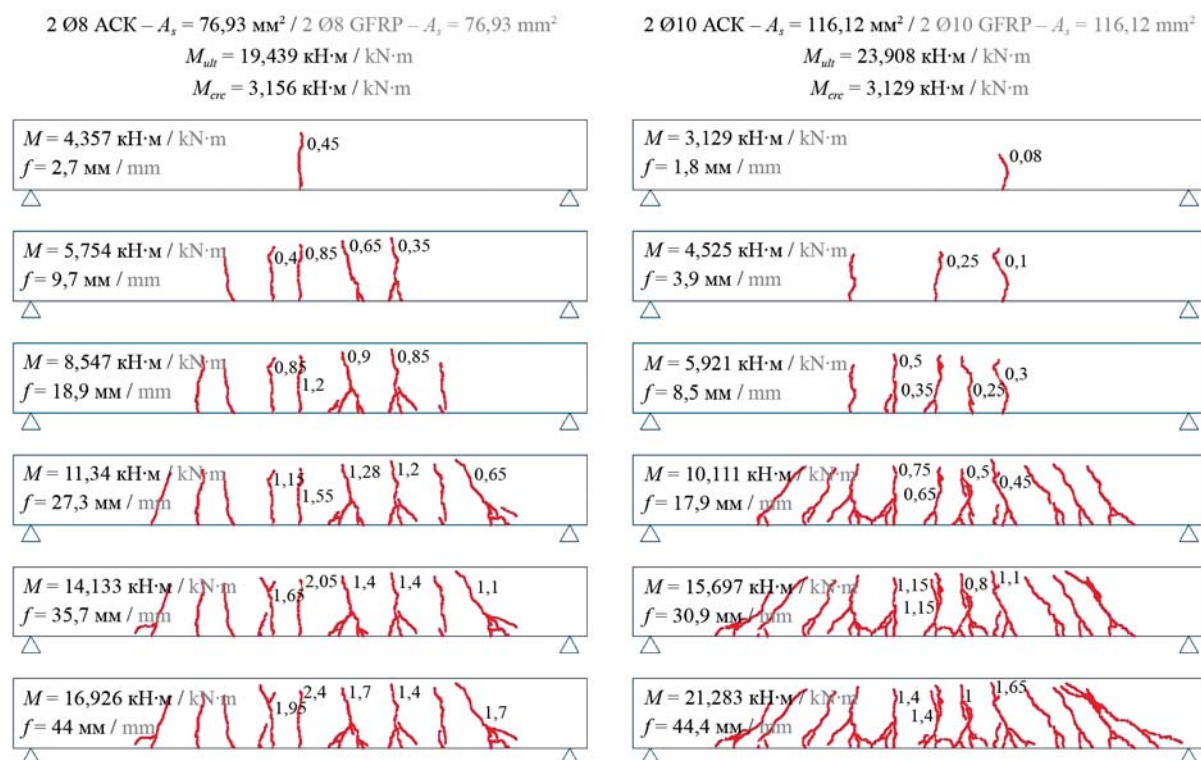


Рис. 3. Характерные стадии развития трещин у балок второй серии, армированных 2 Ø8 АСК и 2 Ø10 АСК

Fig. 3. Typical cracking patterns of series 2 beams, reinforced with two 2 Ø8 GFRP and 2 Ø10 GFRP bars

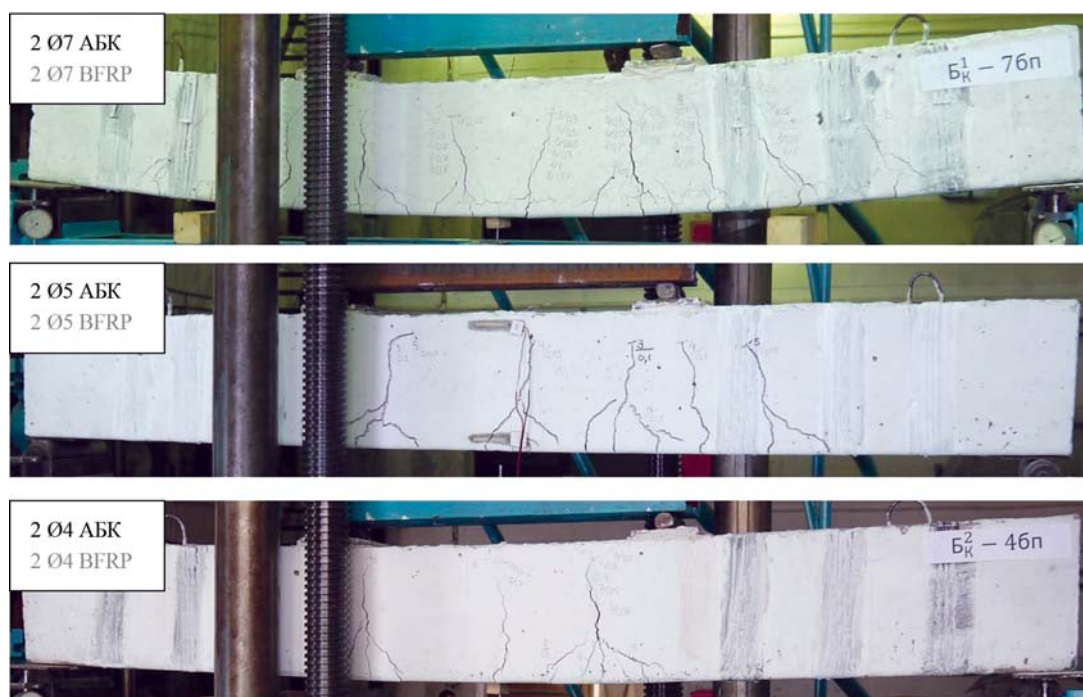


Рис. 4. Характер трещинообразования у балок третьей серии, армированных с 2 Ø7 АБК, 2 Ø5 АБК и 2 Ø4 АБК

Fig. 4. Typical cracking patterns of series 3 beams, reinforced with 2 Ø7 BFRP, 2 Ø5 BFRP, and 2 Ø4 BFRP bars

тонных аналогов. На момент образования трещин разница достигает 70 %, затем по мере нагружения она снижается. Анализ работы балок на стадии разрушения представлен в ранее опубликованной статье [30].

Рассмотрим особенности развития трещин у исследуемых балок с АКП при достижении предельной ширины раскрытия трещин 0,7 мм:

- у балок, армированных 2 Ø4 АБК, на данном этапе образовалась только одна трещина. Стоит отметить, что у данных балок процент армирования меньше минимальной допустимой величины;
- у балок, армированных 2 Ø6 АСК, образовались две трещины;
- у балок, армированных 2 Ø8 АСК, 2 Ø10 АСК, 2 Ø5 АБК и 2 Ø7 АБК, образовалось от 5 до 10 трещин, при этом в растянутой зоне произошло их «разветвление». У балок с 2 Ø8 АСК и 2 Ø10 АСК «разветвление» трещин произошло у одного из двух образцов балок. Причина отличий в трещинообразовании идентичных образцов балок неясна, так как арматурные стержни использовались из одной бухты, бетонная смесь изготавливалась в заводских условиях одной партией для всех балок каждой серии;

- у балок, армированных стальной арматурой, при достижении предельной ширины раскрытия трещин 0,4 мм образовались от 5 до 10 трещин, «разветвление» трещин не происходило.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с вышеизложенным возникает вопрос: какую величину базового расстояния между трещинами l_f следует принимать при наличии одной или двух трещин, при «разветвлении» трещин? Результаты экспериментальных исследований показывают, что действующие отечественные нормативные документы (СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017) не позволяют выполнить корректный и достоверный прогноз образования и ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой. На данном этапе подход, реализованный в методике АСІ 440.1R-06, является более достоверным, что подтверждает меньшее (32,8 %) отклонение теоретических данных от экспериментальных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26.
2. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: Experimental testing and numerical simulation // Journal of Composites for Construction. 2020. Vol. 24. Issue 2. P. 04020007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
3. Mohammed R.S., Zhou F. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars // Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 5. Issue 11. Pp. 2296–2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
4. Pawłowska D., Szumigala M. Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams — experimental and numerical studies // 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). Procedia Engineering. 2015. Vol. 108. Pp. 518–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.114
5. Acciai A., D'Ambrisi A., De Stefano M., Feo L., Focacci F., Nudo R. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 89. Pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002
6. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanou A.S. Analytical and experimental flexural behavior

- of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 84. Pp. 354–366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
7. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 606–619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
8. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams // Composite Structures. 2017. Vol. 182. Pp. 674–685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
9. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guedagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Issue 5. Pp. 2125–2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007
10. Urbanski M., Lapko A., Garbacz A. Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1183–1191. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.149
11. Ruan X.J., Lu C.H., Xu K., Xuan G.Y., Ni M.Z. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars // Composite Structures. 2020. Vol. 235. P. 111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772

12. *Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M.* Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 131. Pp. 231–242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007
13. *Kim S., Kim S.* Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2019. Vol. 18. Issue 2. Pp. 89–97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814
14. *Pan M.X., Xu X.S.* Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 61. P. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012037
15. *Lapko A., Urbański M.* Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15. Issue 1. Pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.008
16. *Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C.* Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced // *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008)*. Zurich, Switzerland, 2008.
17. *Peng F., Xue W.* Design approach for flexural capacity of concrete T-beams with bonded prestressed and nonprestressed FRP reinforcements // *Composite Structures*. 2018. Vol. 204. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.091
18. *Sun Y., Liu Y., Wu T., Liu X., Lu H.* Numerical analysis on flexural behavior of steel fiber-reinforced LWAC beams reinforced with GFRP bars // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 23. P. 5128. DOI: 10.3390/app9235128
19. *Имомназаров Т.С., Аль Сабри Сахар А.М., Дириев М.Х.* Применение композитной арматуры // *Системные технологии*. 2018. № 2 (27). С. 24–29.
20. *Gross S., Yost J., Kevgas G.* Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads // *High Performance Materials in Bridges*. 2003. DOI: 10.1061/40691(2003)40
21. *Benmokrane B., Brown V.L., Mohamed K., Nanni A., Rossini M., Shield C.* Creep-rupture limit for GFRP bars subjected to sustained loads // *Journal of Composites for Construction*. 2019. Vol. 23. Issue 6. P. 06019001. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000971
22. *D'Antino T., Pisani M.A.* Long-term behavior of GFRP reinforcing bars // *Composite Structures*. 2019. Vol. 227. P. 111283. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111283
23. *Barris C., Torres L., Comas J., Mias C.* Cracking and deflections in GFRP RC beams: an experimental study // *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 55. Pp. 580–590. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.019
24. *Feizbahr M., Jayaprakash J., Jamshidi M., Keong C.K.* Review on various types and failures of fibre reinforcement polymer // *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013. Vol. 13. Issue 10. Pp. 1312–1318. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.10.1180
25. *Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г.* Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных // *Наука и техника*. 2019. Т. 18. № 2. С. 155–163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163
26. *Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K.* Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach // *Composite Structures*. 2020. Vol. 234. P. 111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664
27. *Miàs C., Torres L., Guadagnini M., Turon A.* Short and long-term cracking behaviour of GFRP reinforced concrete beams // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 77. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.024
28. *Антаков И.А.* Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой // *Жилищное строительство*. 2018. № 5. С. 15–18.
29. *Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A.* Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 890. P. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

Поступила в редакцию 2 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илшат Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ПИНЦ ID: 621651, Scopus: 54403302600, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; itmir@kgasu.ru;

Игорь Андреевич Антаков — ассистент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ПИНЦ ID: 988840, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Алексей Борисович Антаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);** 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 260835, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru.

REFERENCES

1. Rimshin V.I., Merkulov S.I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:22-26. (rus.).
2. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: Experimental testing and numerical simulation. *Journal of Composites for Construction*. 2020; 24(2):04020007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
3. Mohammed R.S., Zhou F. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars. *Civil Engineering Journal*. 2019; 5(11):2296-2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
4. Pawłowska D., Szumigala M. Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams — experimental and numerical studies. *7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015)*. *Procedia Engineering*. 2015; 108:518-525. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.114
5. Acciai A., D'Ambrisi A., De Stefano M., Feo L., Focacci F., Nudo R. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 89:397-407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002
6. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanou A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*. 2015; 84:354-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
7. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars. *Engineering Structures*. 2018; 173:606-619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
8. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams. *Composite Structures*. 2017; 182:674-685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
9. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(5):2125-2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007
10. Urbanski M., Lapko A., Garbacz A. Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*. 2013; 57:1183-1191. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.149
11. Ruan X.J., Lu C.H., Xu K., Xuan G.Y., Ni M.Z. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars. *Composite structures*. 2020; 235:111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772
12. Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2017; 131:231-242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007
13. Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2019; 18(2):89-97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814
14. Pan M.X., Xu X.S. Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 61:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012037
15. Lapko A., Urbański M. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015; 15(1):223-230. DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.008
16. Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C. Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008)*. Zurich, Switzerland, 2008.
17. Peng F., Xue W. Design approach for flexural capacity of concrete T-beams with bonded prestressed and nonprestressed FRP reinforcements. *Composite Structures*. 2018; 204:333-341. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.091
18. Sun Y., Liu Y., Wu T., Liu X., Lu H. Numerical analysis on flexural behavior of steel fiber-reinforced LWAC beams reinforced with GFRP bars. *Applied Sciences*. 2019; 9(23):5128. DOI: 10.3390/app9235128
19. Imomnazarov T.S., Al-Sabri S.A.M., Dirie M.H. The use of composite reinforcement. *System Technologies*. 2018; 2(27):24-29. (rus.).
20. Gross S., Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads. *High Performance Materials in Bridges*. 2003. DOI: 10.1061/40691(2003)40
21. Benmokrane B., Brown V.L., Mohamed K., Nanni A., Rossini M., Shield C. Creep-rupture limit

for GFRP bars subjected to sustained loads. *Journal of Composites for Construction*. 2019; 23(6):06019001. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000971

22. D'Antino T., Pisani M.A. Long-term behavior of GFRP reinforcing bars. *Composite Structures*. 2019; 227:111283. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111283

23. Barris C., Torres L., Comas J., Mias C. Cracking and deflections in GFRP RC beams: an experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 55:580-590. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.019

24. Feizbahr M., Jayaprakash J., Jamshidi M., Keong C.K. Review on various types and failures of fibre reinforcement polymer. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013; 13(10):1312-1318. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.10.1180

25. Begunova N.V., Grahov V.P., Vozmishchev V.N., Kislyakova I.G. Comparative evaluation of results on test of concrete beams with fiberglass rebar and calculated data. *Science and Technique*. 2019; 18(2):155-163. (rus.).

26. Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K. Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach. *Composite Structures*. 2020; 234:111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664

27. Miàs C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. Short and long-term cracking behaviour of GFRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*. 2015; 77:223-231. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.024

28. Antakov I.A. Features of behavior of flexural members with composite polymeric reinforcement under load. *Housing Construction*. 2018; 5:15-18. (rus.).

29. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

Received December 2, 2020.

Adopted in revised form on December 14, 2020.

Approved for publication on December 14, 2020.

B I O N O T E S : **Ishat T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 621651, Scopus: 54403302600, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; itmir@kgasu.ru;

Igor A. Antakov — assistant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 988840, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Alexey B. Antakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 260835, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru.

О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства

А.В. Перельмутер¹, О.В. Кабанцев²

¹ Научно-производственное объединение «СКАД Софт» (НПО «СКАД Софт»); г. Киев, Украина;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Нормы сейсмостойкого строительства претерпели за последнее десятилетие три редакции, появление каждой из которых сопровождалось бурными дискуссиями. Но при этом в подход к планируемому уровню сейсмобезопасности и к методам ее обеспечения не вносились коренные изменения. Сегодня научно-технический уровень этих норм не удовлетворяет многих специалистов, ввиду чего инженерное сообщество рассматривает вопрос о разработке норм нового поколения. Цель работы — фиксация внимания специалистов не столько на методологических вопросах проектирования, сколько указание на нерешенные или недостаточно развитые вопросы. По некоторым из них представлены варианты решения, которые следует рассматривать как материал для дискуссии.

Материалы и методы. Анализируются нормативные требования к средствам и методам сейсмозащиты, публикации с предлагаемыми совершенствованиями, нормативные документы различных стран. Рассматривается опыт реализации нормативных требований в программно-вычислительных комплексах.

Результаты. Отмечена важность установления связи предельных состояний конструкций с категориями технического состояния объектов во время и после сейсмических воздействий и формулировки требований к расчету зданий и сооружений, разного уровня ответственности при проверке их работы на воздействия землетрясений различной повторяемости. Формулируются соответствующие рекомендации, которые предлагаются для обсуждения в качестве стартовых. Указывается на необходимость более детального регулирования расчетов во временной области, и называются проблемы, нуждающиеся в разработке как относительно исходной сейсмологической информации, так и относительно рабочих диаграмм деформирования для материала конструкции. Приведены соображения о наборе требований для проектирования объектов по схеме «здание + основание», о граничных условиях для рассматриваемой части основания и о пересчете акселерограмм на ее нижнюю границу.

Выводы. Приведенные соображения, хотя и не претендуют на окончательное решение указанных проблем, могут послужить основой для разработки норм нового поколения, материалом, инициирующим соответствующие исследования и принятие решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проектирование, многоуровневый расчет, предельные состояния, акселерограмма, поглощающая граница, нормы проектирования, эксплуатационные характеристики, повреждения конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1673–1684. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684

On conceptual provisions of design standards for earthquake-resistant construction

Anatoly V. Perelmuter¹, Oleg V. Kabantsev²

¹ Scientific and Production Company “SCAD Soft” Ltd; Kiev, Ukraine;

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

ABSTRACT

Introduction. The standards for earthquake-resistant construction have undergone three revisions over the past decade. Each new revision was accompanied by serious discussions. However, no fundamental changes were made to the planned level of seismic safety and methods of safety assurance. Today the scientific and technical level of these standards does not satisfy many specialists, that's why the engineering community is considering the development of new generation standards. The overall purpose of the work is to focus the attention of specialists not so much on methodological issues of design, as on unresolved or underdeveloped issues. For some of them, solutions are presented that should be considered as the subject for discussion.

Materials and methods. Analyses of the regulatory requirements for the means and methods of seismic protection, publications with proposed improvements, and a comparative analysis of regulatory documents of different countries were carried out. We also analyzed the experience of implementing regulatory requirements in software systems.

Results. The importance of establishing a relationship between the limit states of structures and the categories of the technical state of facilities during and after seismic impacts was emphasized. The importance of formulating requirements for the analysis of buildings and structures, different levels of responsibility when checking their response to effects of earth-

quakes, having different recurrence, was also emphasized. We have formulated relevant recommendations that are offered as starting points of discussions. The need for more detailed regulation of the analysis in the time domain was highlighted. Problems were identified that need to be solved both with respect to the initial seismological information and with respect to draft strain diagrams describing the construction material. Considerations were provided on the set of requirements for the design of construction facilities according to the "building + base" pattern, boundary conditions for the considered part of the base and the recalculation of accelerograms in terms of their lower boundaries.

Conclusions. Although the above considerations do not claim to be the final solution to these problems, they can serve as the basis for the development of a new generation of standards or as a material, which initiates relevant research and decision making.

KEYWORDS: design, multilevel analysis, limit states, accelerogram, absorbing boundary, design standards, performance characteristics, structural damage

FOR CITATION: Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On conceptual provisions of design standards for earthquake-resistant construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1673-1684. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Совокупность нормативных документов, составляющая строительные нормы и правила, определяет технический уровень принимаемых решений и, как следствие, качественные показатели проектируемых конструкций. Поскольку технические и материальные возможности общества со временем возрастают, то меняются и зафиксированные в нормах требования к уровню безопасности, удобству эксплуатации, долговечности и другим качественным показателям проектируемых зданий и сооружений, что приводит к периодическому (примерно раз в 5 лет) изменению норм. Естественно, что при этом всегда возникает спор между новизной и необходимым для нормативных документов некоторым уровнем консервативности.

Среди норм строительного проектирования наиболее дискуссионным, пожалуй, является документ «Строительство в сейсмических районах», претерпевший за последнее десятилетие, не считая изменений, три редакции (2011, 2014 и 2018 гг.), появление каждой из которых сопровождалось бурными дискуссиями [1].

Как отмечалось в работе [2], многие положения действующих норм не пересматривались почти полвека, хотя основывались в свое время на опыте сейсмозащиты малоэтажной застройки и, кроме того, содержали некоторые недостаточно обоснованные рекомендации. Представленные в нормах указания по расчету в основном ориентированы на их выполнение ручными расчетными технологиями, а упоминания о возможности использования программных комплексов являются формальными, поскольку не содержат необходимой информации. Характерна следующая цитата из СП 14.13330.2018¹: «Формулы (5.1), (5.2) и (5.3), (5.4) верны только для несогласованной диагональной матрицы масс РДМ. В большинстве вычислительных комплексов применяются более общие выражения в векторно-матричной форме». О том, что эти более общие выражения

тоже должны быть нормированными, и не векторно-матричная запись определяет правильность или ошибочность формулы, даже не упоминается и получается, что программный комплекс диктует нормам, а не наоборот.

Несовершенство некоторых положений норм проектирования не осталось без внимания. Критические выступления в печати, касающиеся различных редакций нормативного документа, относились к вопросам редуцирования сейсмического воздействия и используемого для редуцирования коэффициента K_1 [3–5], использования графика коэффициента динамичности вместо спектра ускорений [6], способов учета демпфирования [7], методики учета направления сейсмического воздействия [8] и ряда других проблем расчетного обоснования сейсмостойкости.

Но критика при этом в основном относилась к вопросам, отраженным в тексте норм, которые, по мнению указанных авторов, были решены неправильно и нуждались в корректировке. Постепенно становилось ясным, что всякого рода «косметические» поправки не решают проблему, и речь должна идти о нормах нового поколения.

Необходимость в их создании была осознана относительно недавно. В 2017 г. Международной инженерной академией (МИА), Российской инженерной академией (РИА) совместно с Инженерной академией Армении и Национальной инженерной академией Республики Казахстан, Российской Ассоциацией по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий — РАСС объявлен открытый конкурс «На лучшую концепцию системы нормативной документации в области сейсмостойкого строительства».

Важные соображения по этому поводу высказаны в работах [9–12], к этому же направлению прилагается и настоящая работа, в которой упор сделан на проблемы, которые обойдены вниманием в существующих нормах или освещены в них недостаточно и которые нужно было бы отразить в нормах нового поколения. При этом речь идет об изменениях, затрагивающих принципиальные положения и подходы к проблеме сейсмостойкого строительства.

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.

Следует отметить, что и за рубежом активно обсуждается потребность пересмотра некоторых основных положений сейсмостойкого строительства. Так, например, в труде [13] отмечается необходимость в смене парадигмы от традиционного подхода, основанного на силе, к более рациональным методам проектирования, основанным на перемещении, для ограничения повреждений и получения однородной оценки сейсмического риска различных конструкций.

Авторы работы [14] отмечают, что количество разрушенных жилых домов меньше, чем количество частично поврежденных. Они также предполагают, что травмы людей часто не результат обрушения несущих конструкций, а были вызваны обрушением неструктурных элементов. Представлена предлагаемая философия проектирования, которая пытается реализовать влияние землетрясений на несмертельные человеческие жертвы.

Другой аспект проблемы представлен в публикации [15], указывается, что во время недавних сильных землетрясений замечено, что многие правильно спроектированные и построенные здания, которые не рухнули, больше не функционировали и были впоследствии снесены, а не отремонтированы. Принимая во внимание такие ситуации, философия сейсмостойкого проектирования, разработанная в прошлом веке, теперь должна быть пересмотрена. Ее требуется изменить с переходом от спасения жизней к обеспечению непрерывности эксплуатации, а конструкции должны быть спроектированы так, чтобы их можно было быстро восстановить до полного режима работы с минимальными нарушениями и затратами после сильного землетрясения.

Эти соображения зарубежных специалистов должны и могут быть учтены при создании норм нового поколения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа подготовлена на основе анализа различных источников, описывающих подход к обеспечению сейсмостойкости зданий и сооружений, куда входили научно-технические публикации и нормативные документы по проектированию. Основное внимание уделено принципиальным положениям нормативных документов, которые указывают цели и определяют подход к обеспечению сейсмобезопасности. Рассматривались история развития этих положений и их представления в нормативных документах, изучались работы по сопоставлению норм разных стран [16–18] и анализировались способы их реализации в программно-вычислительных комплексах СКАД, ЛИРА, STAAD, MicroFE. Заметим, что именно программная реализация является одним из наиболее жестких способов выявления недоговоренностей и противоречий, если таковые присутствуют в нормах.

Важным источником критического подхода к нормам сейсмического проектирования и выработки некоторых концептуальных предложений служит практическая работа авторов по проектированию ряда высокоответственных сооружений, например, таких как Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленные ниже соображения относятся к отдельным важнейшим аспектам норм. Они не столько формулируют предложения для включения в нормы нового поколения, сколько акцентируют внимание на проблемах, которые нуждаются в отображении на страницах нормативного документа. А сами по себе предложения следует рассматривать как заявочный материал, приглашающий к дискуссии.

Общая структура

Действующий нормативный документ декларирует универсальность сферы применения, однако более детальное рассмотрение содержания норм показывает, что реальная сфера их применения существенно отличается от заявленной.

Так, например, раздел 6 «Жилые, общественные, производственные здания и сооружения» целиком посвящен зданиям. Не нашлось ни одного слова о сооружениях (транспортные галереи, резервуары, трубопроводы и др.). Наличие разделов, посвященных транспортным и гидротехническим сооружениям, является абсолютно формальным, поскольку для них существуют специальные нормативные документы СП 268.1325800.2016² и СП 358.1325800.2017³.

Заметим, что Еврокод 8 имеет следующие части:

Часть 1. Общие правила, сейсмические воздействия, правила сооружений.

Часть 2. Мосты.

Часть 3. Оценка состояния и восстановление зданий.

Часть 4. Силосные башни, резервуары и трубопроводы.

Часть 5. Фундаменты, подпорные конструкции и геотехнические аспекты.

Часть 6. Башни, мачты и дымовые трубы.

По-видимому, еще до начала работы над нормами нового поколения следует определить их структуру и содержание, а также форму представления в виде набора отдельных нормативных документов, как комплект пособий, составляющих окружение основного нормативного документа или нечто другое.

² СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования.

³ СП 358.1325800.2017. Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах.

Во всех случаях очень важно определить сведения и правила, имеющие общий характер и совершенно не зависящие от конструктивного решения или назначения объекта строительства (сейсмическое районирование, классификация грунтовых условий, параметры сейсмического движения, требования к уровню сейсмостойкости и т.п.). Сегодня частности прорываются в общий раздел, что иногда создает затруднения.

Критерии сейсмостойкости

Идеология сейсмостойкого строительства предусматривает возможность локальных разрушений, которые могут быть устранены после землетрясения, что, вообще говоря, расширяет стандартную логику строительного проектирования, основанную на понятии о предельных состояниях первой группы, к которой ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» относит только:

- разрушение любого характера (например, пластическое, хрупкое, усталостное);
- потерю устойчивости отдельных конструктивных элементов или сооружения в целом;
- условия, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (например, чрезмерные деформации в результате деградации свойств материала, пластичности, сдвига в соединениях, а также чрезмерное раскрытие трещин).

Здание или сооружение может подвергаться воздействиям землетрясений различной интенсивности: слабым чаще, сильным реже. Как при этом поведет себя конструкция и, главное, *как она должна себя повести?* На этот вопрос нормы должны давать четкий ответ. В частности, необходимы указания относительно предельных состояний, которые относятся к тем или иным расчетным ситуациям, возникающим при сейсмических воздействиях различного уровня интенсивности — расчетное землетрясение, максимальное (контрольное) землетрясение.

При расчете по предельным состояниям первой группы, как правило, рассматривается локальная несущая способность расчетного сечения. Но понятие «несущая способность» имеет и более широкий смысл, если говорить о конструкции (несущей системе) в целом. Известно, что невыполнение условия прочности в сечении далеко не всегда приводит к катастрофическим последствиям.

Однако сформулировать достаточно общий критерий достижения предельного состояния всей конструкции пока не удается, поскольку для каждой конструкции это будет свое индивидуальное предельное состояние. При заданном воздействии оно определяется механизмом разрушения отдельных сечений и связано с очередностью их появления и с их видом (по хрупкому сценарию или с образованием пластических шарниров). Но в таком случае представляется обоснованным использовать

обобщенное для несущей системы здания в целом описание предельных состояний. Его описание не может быть узкотехническим, а должно выражаться в терминах, определяющих возможности функционирования здания или сооружения, те или иные ограничения которого и определяют предельное состояние.

В качестве типичного примера такого подхода можно указать на руководства американского Федерального агентства по управлению в чрезвычайных ситуациях (FEMA), в котором содержатся 4 контролируемых уровня эксплуатационных характеристик для зданий (сооружений) в целом⁴:

- Operational Level (OL) — эксплуатационный уровень. Все функции здания поддерживаются службами эксплуатации, повреждения пренебрежимо малы.
- Immediate Occupancy Level (IOL) — уровень полной пригодности для жизни, но может потребоваться минимальный ремонт;
- Life Safety Level (LSL) — уровень безопасности для жизни. Конструкция остается устойчивой и имеет значительный резерв несущей способности, опасные неконструктивные повреждения контролируются;
- Collapse Prevention Level (CPL) — уровень предотвращения обрушения. Возможны любые повреждения, но полного обрушения пока нет.

Принципиальный отказ от прочностно-силового описания предельных состояний первой группы для конструктивных элементов и ориентация на эксплуатационные характеристики поведения конструктивного комплекса здания (сооружения) в целом, кроме всего прочего, вводит в обиход представление о возможной реализации нескольких предельных состояний в течение жизни строительного объекта, поскольку они сводятся, по сути, лишь к перерывам в эксплуатации.

Привязка предельных состояний к обеспечению эксплуатационных свойств в различных расчетных ситуациях дает возможность более гибко определять соответствующие технические ограничения, которые для сейсмике, например, определяют поведение конструкций при землетрясениях разной силы, действующих на один тот же объект. При этом уровень эксплуатационных характеристик здания и уровень обеспечения сейсмостойкости уже можно задавать в виде перечня допускаемых повреждений отдельных видов конструктивных (несущих) и неконструктивных элементов здания. Например (по аналогии с работой⁴), представляется возможным выявить следующие признаки повреждения отдельных видов конструкций после землетрясения с увязкой признаков с уровнем эксплуатационных характеристик (табл. 1).

⁴ FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. October, 1997.

Табл. 1. Признаки повреждений конструкций при различных уровнях эксплуатационных характеристик несущей системы
Table 1. The evidence of structural damage for different performance characteristics of the bearing construction

Вид конструкции The type of construction	Уровень эксплуатационных характеристик несущей системы The level of performance characteristics of the bearing construction		
	Уровень полной пригодности для жизни с ремонтными работами Immediate occupancy level	Уровень безопасности для жизни Life safety level	Уровень предотвращения обрушения Collapse prevention level
Несущие железобетонные стены (диафрагмы) Bearing reinforced concrete walls (diaphragm plates)	По плоскости стены и у отверстий формируются локальные трещины с раскрытием <1,5 мм Local cracks, having <1.5 mm openings, are formed on the wall surface and next to holes	Формируются наклонные трещины и локальные повреждения в краевых зонах, происходят сдвиги по стыкам и трещинам на локальных участках, формируются трещины и незначительные повреждения в зонах отверстий Diagonal cracks and local damages appear in the edge zones, shears occur along junctions and cracks in local areas, cracks and minor damages appear next to holes	Формируются системы трещин, происходят сдвиги по стыкам и трещинам, локальные разрушения в зонах отверстий, локальные разрушения в краевых зонах Systems of cracks are formed, shears occur along junctions and cracks, local destructions occur in the areas of holes and in the edge zones
Ненесущие железобетонные конструкции (перегородки и т.п.) Non-bearing reinforced concrete constructions (partitions, etc.)	По плоскости стены и у отверстий формируются локальные трещины с раскрытием < 3,0 мм Local cracks, having < 3.0 mm openings, are formed on the wall surface and next to holes	Формируются крупные трещины, происходят сдвиги по стыкам и трещинам, локальные разрушения в зонах отверстий, локальные разрушения в краевых зонах Major cracks are formed; shears occur along junctions and cracks; local destructions occur in the areas of holes and in the edge zones	Конструкции разрушены, возможны обвалы конструкций Constructions are ruined, collapse may occur
Железобетонные колонны несущих рамных конструкций Reinforced concrete columns of bearing framed constructions	Незначительные трещины бетона колонн, отсутствие дробления бетона Minor cracks in the column concrete; no concrete fragmentation	Формирование трещин бетона с раскрытием < 3,0 мм, локальные сдвиги по трещинам в отдельных колоннах Cracks, having < 3.0 mm openings, are formed in the concrete, local shears occur along cracks in some columns	Обширные зоны трещинообразования бетона, локальные пластические деформации продольной арматуры, локальные разрушения бетона приопорных зон колонн Extensive concrete crack propagation areas; plastic deformations of the longitudinal reinforcement; local destruction of concrete in the column support areas

На основе детального описания признаков повреждений конструкций при сейсмических воздействиях представляется возможным сформулировать и научно обосновать величины критериев предельных состояний конструкций, которые и должны быть приведены в нормах проектирования сейсмостойких зданий (к сожалению, такой подход от-

сутствует в отечественных нормах). Тогда задачей проектирования станет проверка их выполнения. Собственно проверка поведения является сутью любых норм проектирования.

И здесь возникает вопрос о многоуровневом расчете [20–22], поскольку для одного и того же сооружения, на которое действуют различные

землетрясения, могут предъявляться различные требования к поведению конструкций и к уровню эксплуатационных характеристик, которые могут быть допущены при сейсмических воздействиях различной повторяемости и интенсивности. Естественно, что при этом рассматривается сейсмический риск, его экономическая [23] и социальная составляющие [24].

Указанные требования могут дифференцироваться применительно к сооружениям различного типа, и какие именно критериальные требования предъявляются к сооружению, зависит от класса его ответственности и от того, для землетрясения какой силы (расчетного ускорения) выставляется то или иное требование.

Например, это может выглядеть так, как показано в табл. 2, где классификация объектов по назначению соответствует табл. 5.1 СП 14.13330.2018, а тип критериальных требований аналогичен работе⁴.

Аналогичные предложения содержатся в монографии американских исследователей [25], где приведена поучительная табл. 3 системы расчетных проверок, которые должны выполняться при проектировании сооружений с различными критериями требуемого поведения.

Сочетания нагрузок

Сейсмическое воздействие нормативный документ рассматривает изолированно и зачастую при этом дает ошибочные рекомендации. Примером может служить вопрос о невыгодном направлении сейсмического воздействия, который в нормах рассматривается изолированно, в то время как это направление следует определять для комбинации «сейсмика + постоянные нагрузки».

При выполнении расчетов во временной области важной отличительной чертой оценки нелинейного поведения конструкции является учет ее состояния до начала землетрясения. Результат су-

Табл. 2. Критериальные требования

Table 2. Criteria-based requirements

Назначение здания или сооружения The function of a building or a structure	Тип критериальных требований при землетрясении, с вероятностью превышения за 50 лет Criteria-based requirements applicable in case of an earthquake, given the likelihood of their overmatching over a period of 50 years		
	1 % (карта C) / 1 % (Card C)	5 % (карта B) / 5 % (Card B)	10 % (карта A) / 10 % (Card A)
Позиция 1 / Position 1	IOL	OL	—
Позиция 2 / Position 2	LSL	IOL	OL
Позиция 3 / Position 3	—	LSL	IOL

Табл. 3. Зависимость предельных состояний от эксплуатационных требований

Table 3. Dependence of limit states on operational requirements

Проверяемые предельные состояния Verifiable limit states	Техническое состояние, обеспечивающее Technical condition that ensures:		
	эксплуатацию без ограничений unlimited operation	контроль локальных повреждений control over local destructions	предотвращение общего обрушения prevention of complete collapse
Трещиностойкость / Crack resistance			
Краевая текучесть Flowability in boundary areas			
Пластическая работа / Plastic behaviour			
Локальное выпучивание / Local popping			
Выкалывание / Chipping			
Усталостная прочность / Fatigue strength			
Общая устойчивость / Overall stability			
Недопустимые осадки основания Unacceptable settlements of substructures			

Примечание: Предельные состояния проверяются в отмеченных ячейках.

Note: Limit states are checked in the marked cells.

щественно зависит от предварительной нагруженности конструкции, в частности, от того, была ли она в пластике или работала упруго.

Вообще, вопрос сочетания сейсмической нагрузки с другими воздействиями во всех редакциях сейсмических норм излагается без изменений уже на протяжении почти полувека. Он сведен к элементарной рекомендации об использовании коэффициентов сочетания 0,9 для постоянных; 0,8 для временных длительных и 0,5 для кратковременных нагрузок.

Обоснованность этих рекомендаций вызывает большие сомнения. Так, например, значения приведенных в СП 20.13330⁵ кратковременных полезных нагрузок для жилых зданий являются эквивалентными по изгибающему моменту в перекрытии и превышают их возможный суммарный вес более чем вдвое [26, с. 28]. Казалось бы, это учтено коэффициентом сочетаний 0,5, но тогда получается, что авторы норм предполагают, что во всех помещениях зданий одновременно реализована расчетная нагрузка, что представляется маловероятным [27].

Проблема состоит еще и в том, что некоторые из временных нагрузок обладают инерционными свойствами и могут влиять на динамические характеристики сооружения. Поскольку любая из временных нагрузок может отсутствовать, то в некоторых случаях возникает слишком большое число вариантов, которые, вообще говоря, следует сравнить при выборе расчетной комбинации. При этом следует еще обеспечить вхождение в расчетную комбинацию усилий от временных нагрузок в том же составе, что и для подсчета масс для динамического расчета.

Выходом из положения могло бы быть указание на то, что динамические характеристики сооружения принимаются без учета временных нагрузок. При этом учитываются нормативные значения постоянных нагрузок. Поскольку при этом масса сооружения уменьшается, то уменьшается и период собственных колебаний, что в большинстве случаев является решением в запас прочности.

Скорее всего, здесь нужна оговорка, что если суммарный вес временных нагрузок сопоставим с суммой постоянных нагрузок, то следует рассмотреть оба варианта (резервуар полный и резервуар пустой).

Нелинейный динамический расчет во временной области

Этот расчет выполняется в самых ответственных случаях, но именно ему нормы уделяют наименьшее внимание. Для них не приведены даже основные требования, которые должны выполняться в таком расчете:

- возможная форма применяемой упругопластической модели деформирования материала несущих конструкций;

⁵ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

- требуется ли учитывать начальные несовершенства, начальное напряженно-деформированное состояние и случайные эксцентриситеты;

- требуется ли учитывать геометрическую нелинейность и т.п.

Два основных фактора, определяющих качество такого расчета, это — акселерограммы (1) и характеристики неупругого поведения материалов (2). И в обоих случаях нормы отправляют нас к другим источникам, где эти характеристики якобы определены. В частности, построение акселерограмм отнесено к компетенции СП 286.1325800⁶ и привязано к процедуре детального сейсмического районирования. Но в этом документе говорят только об одной акселерограмме. Как формируется пакет, остается неизвестным, нет даже упоминаний о трехкомпонентных акселерограммах, об отличии их для вертикальной и горизонтальной компонент.

Нельзя полностью отдавать этот вопрос изыскателям (сейсмологам), нормы сейсмического проектирования являются заказчиком для изыскателей и должны содержать хотя бы минимальные требования к акселерограммам (продолжительность реализации, статистическая независимость составляющих трехкомпонентной акселерограммы и т.п.).

Говоря о наборе акселерограмм, нормы не определяют, сколько акселерограмм следует использовать и как обрабатываются результаты расчетов по ним. Еврокод 8, например, требует использования как минимум трех акселерограмм, и необходимо учитывать при этом наиболее невыгодное значение реакции сооружения. Применительно к искусственным акселерограммам следует явно указать на возможность их конструирования «под площадку» и «под сооружение» [28, 29] и привести рекомендации относительно их применения.

Нужно помнить, что представленные в нормах проектирования соответствующих конструкций диаграммы работы бетона, стали и др. предназначены для проверки несущей способности по первой группе предельных состояний при действии кратковременных (не динамических!) нагрузок. Необходимо подчеркнуть, что указанные диаграммы работы материала соответствуют весьма малой вероятности реализации (порядка 10^{-3}). Вероятность того, что весь объект состоит из такого материала, исчезающе мала, и ее не следует принимать во внимание.

Требуются диаграммы, ориентированные на другую вероятность и, как минимум, в общем расчете необходимо использовать нормативные, а не расчетные значения (этот подход принят для всех других особых ситуаций).

Важен вопрос о предельно допустимой деформации, особенно для оценки железобетонных конструкций, где параметр ε_{b2} лежит в основе расчета

⁶ СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.

по нелинейной деформационной теории. Но в нормах дано его значение для проверки на расчетные усилия, а для общего физически нелинейного расчета требуются нормативные характеристики.

Возможно, что приемлемой является следующая гипотеза: для достижения предельного состояния у конструкции с нормативными значениями прочностных параметров энергия деформаций будет в γ_b раз большей, чем у конструкции с расчетными значениями этих параметров. Это — аналог гипотезы снижения прочности в γ_b раз, при переходе от нормативного сопротивления к расчетному, когда считается, что $R_b = R_{b,n}/\gamma_b$.

Для материала с билинейной диаграммой вычисления площадей, которыми определяется энергия деформирования, дают следующие значения (рис. 1):

- расчетная диаграмма

$$\Omega_n = \frac{R_b^2}{2E} + R_b \left(\varepsilon_{b2,n} - \frac{R_b}{E} \right);$$

- нормативная диаграмма

$$\Omega_n = \frac{\gamma_b^2 R_b^2}{2E} + \gamma_b R_b \left(\varepsilon_{b2,n} - \frac{\gamma_b R_b}{E} \right).$$

Из условия $\gamma_b \Omega = \Omega_n$ следует $\varepsilon_{b2,n} = \varepsilon_{b2} + \frac{\gamma_b R_b}{2E}$.

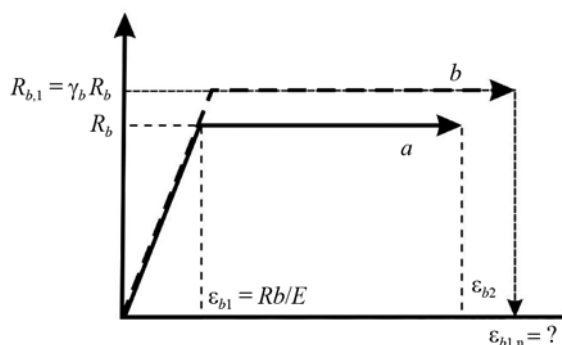


Рис. 1. Зависимость «напряжение – деформация» для расчета конструкции: а — расчетная; б — нормативная

Fig. 1. The stress-strain relationship for the structural analysis: a — design values; b — standard-based values

Учет податливости основания

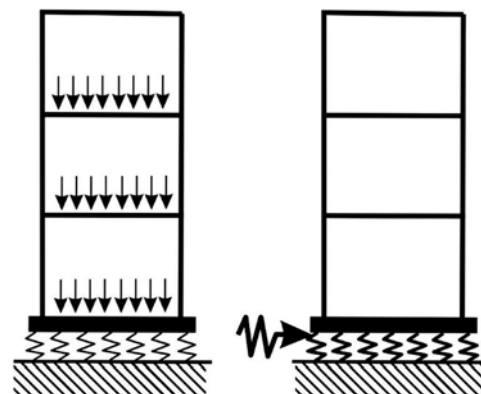
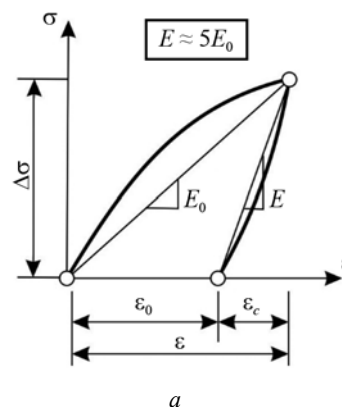
На необходимость учета податливости основания указывалось неоднократно. При использовании модели упругого основания (Винклера или Пастернака) важным параметром служит жесткость основания (коэффициент постели C). При статических расчетах в основе определения C принимают модуль деформации E_0 , который реализуется при достаточно продолжительном деформировании грунта, что не соответствует случаю сейсмического воздействия. Для такого случая следует использовать динамический модуль деформаций, его

значение, как сказано в СП 23.13330.2011⁷, может быть получено в результате специальных полевых и лабораторных испытаний грунтов (п. 5.25). А в качестве первого приближения, по-видимому, можно использовать модуль упругости E (рис. 2, а).

Модуль деформаций характеризует поведение грунта при наличии как упругих, так и остаточных деформаций (первичная ветвь), а модуль упругости, который всегда больше модуля деформаций, определяется при испытаниях образцов грунта при их упругом поведении, которое реализуется при разгрузке (вторичная ветвь).

Таким образом, мы имеем дело с двумя расчетными схемами (рис. 2, б): одна — для учета постоянных и длительных нагрузок, вторая — для учета сейсмического воздействия.

Совместное использование различных расчетных моделей предусмотрено режимами «Вариация моделей» или «Монтаж», которые имеются в программно-вычислительных комплексах СКАД и ЛИРА.



Коэффициент постели C_1
Coefficient of subgrade
reaction C_1

Коэффициент постели C_2
Coefficient of subgrade
reaction C_2

б

Рис. 2. Моделирование жесткости упругого основания

Fig. 2. Elastic foundation stiffness modeling

⁷ СП 23.13330.2011. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85.

В последнее время все большую популярность приобретают расчетные схемы, в которых присутствует значительный грунтовый массив. На необходимости такого расчета настаивают многие нормативные документы по проектированию зданий и сооружений, но о нем ни слова в СП «Строительство в сейсмических районах». Если даже отвлечься от проблемы совместного расчета, то вспомним, что современные здания часто имеют несколько подземных этажей. Аналогичные проблемы возникают при рассмотрении оснований с длинными сваями.

Если при моделировании используются поглощающие границы, то удастся учесть заметное поглощение энергии в толще грунтового основания за счет уноса энергии на бесконечность (волновое демпфирование).

Но возникают вопросы, ответов на которые нет в нормах, например, такие:

1. Какие требования предъявляются к параметрам демпферов на поглощающей границе.
2. Каковы рекомендации относительно размеров присоединяемого массива.
3. Сейсмическое воздействие реализуется на опорной поверхности, а все акселерограммы относятся к дневной поверхности. Как учесть заглубление (и нужно ли его учитывать), остается неясным.

Если, например, предполагается, что сейсмические волны распространяются вертикально, то распределение кинематических параметров вдоль опорной поверхности можно считать равномерным, и ее движение описывается единой акселерограммой. Эту акселерограмму, в принципе, можно полу-

чить с помощью процедуры пересчета ускорений на условную нижнюю границу основания, которая должна получить ускорение на нижней границе, совместимое с заданным законом движения свободной поверхности.

А как меняется (и меняется ли) в связи с переносом уровня воздействия диаграмма коэффициентов динамичности при расчете линейно-спектральным методом, остается неясным. По-видимому, здесь имеется некоторая связь с пересчитанным ускорением, но соответствующие исследования еще предстоит выполнить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше соображения не претендуют на окончательное решение указанных выше проблем, они скорее должны послужить материалом для разработчиков норм нового поколения, материалом, инициирующим соответствующие исследования и принятие решений. Важно, чтобы в этих нормах снова не упустили вопросы дифференцирования критериев поведения при землетрясениях разной интенсивности, которые могут действовать на сооружение. Не менее важной является детализация требований к расчетам во временной области и к используемой при этом сейсмологической информации. Как представляется авторам, указания на пробелы в содержании норм не менее важны, чем окончательные рекомендации. Хотелось бы надеяться, что эти указания послужат стимулом для дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джинчелашивили Г.А., Мкртычев О.В., Соснин А.В. Анализ основных положений СП 14.13330. 2011 «СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах» // О возможных принципиальных ошибках в нормах проектирования, приводящих к дефициту сейсмостойкости сооружений в 1–2 балла : сб. тр. семинара, 15 сентября 2011. М. : МГСУ, 2011. С. 19–27.
2. Курбацкий Е.Н., Мазур Г.З., Мондрус В.Л. Критический анализ состояния нормативной документации по расчету сооружений на землетрясения // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2017. № 2. С. 95–102.
3. Мкртычев О.В., Джинчелашивили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). М. : МГСУ, 2014. 192 с.
4. Кабанцев О.В., Усеинов Э.С., Шарипов Ш. О методике определения коэффициента допускаемых повреждений сейсмостойких конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2 (55). С. 117–129.
5. Соснин А.В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K1 и его согласованности с концепцией редукиции сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 92–114.
6. Курбацкий Е.Н., Мондрус В.Л. Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия? // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2019. № 1. С. 107–114. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-107-114
7. Соснин А.В. К вопросу учета диссипативных свойств многоэтажных железобетонных каркасных зданий массового строительства при оценке их сейсмостойкости // Современная наука и инновации. 2017. № 1 (17). С. 114–131.
8. Тяпин А.Г. «Опасные направления сейсмического воздействия» в линейно-спектральных расчетах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 3. С. 22–29.
9. Тяпин А.Г. Различия между нормами расчета на сейсмические воздействия как потенциальные на-

правления развития норм гражданского строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 1. С. 29–32.

10. Тяпин А.Г. Некоторые соображения о нормах нового поколения. Часть I: общие положения и задание сейсмического воздействия. Часть II: определение сейсмических усилий в линейно-спектральном методе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 7–18.

11. Уздин А.М. Концепция новых норм сейсмостойкого строительства // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2018. № 1 (32). С. 14–18.

12. Гурьев В.В., Дорофеев В.М. К вопросам о разработке норм проектирования сейсмостойкого строительства нового поколения // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 4 (47). С. 20–23.

13. Menon D., Prasad A.M., Varughese J.A. Seismic design philosophy: from force-based to displacement-based design // Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology. 2018. Pp. 273–289. DOI: 10.1007/978-3-319-76855-7_13

14. Gunawan N., Han A., Gan B.S. Proposed design philosophy for seismic-resistant buildings // Civil Engineering Dimension. 2019. Vol. 21. Pp. 1–5. DOI: 10.9744/ced.21.1.1-5

15. Takagi J., Wada A. Recent earthquakes and the need for a new philosophy for earthquake-resistant design // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 499–507. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.11.024

16. Хуэн Л.Т.Т. Краткое сравнение сейсмических норм Европы, Японии, России // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 262–265.

17. Шаторная А.М., Тарасов В.А., Барабаш А.В., Жувак О.В., Рыбаков В.А. Российские и зарубежные нормы сейсмического проектирования зданий и сооружений // Alfabuild. 2018. № 4 (6). С. 92–114.

18. Santos S.H.D.C., Zanaica L., Bucur C., Lima S.D.S. Comparative study of codes for seismic design of structures // Mathematical Modelling in Civil Engineering. 2013. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–12. DOI: 10.2478/mmce-2013-0001

19. Гордеев В.Н., Перельмутер А.В. Стальные конструкции защитных сооружений Чернобыльской

атомной электростанции. Киев : Изд-во «Сталь», 2020. 80 с.

20. Мкртычев О.В., Джинчелашивили Г.А., Дзержинский Р.И. Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. С. 71–78.

21. Yue J. Multilevel seismic damage behavior correlation analysis for RC framed structures // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2018/2364297

22. Fathi-Fazl R., Lounis Z., Cai Z. Multicriteria and multilevel framework for seismic risk management of existing buildings in Canada // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2020. Vol. 34. Issue 2. P. 04020004. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001393

23. Уздин А.М., Воробьев В.А., Богданова М.А., Сигидов В.В., Ваничева С.С. Экономика сейсмостойкого строительства. М. : ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. 176 с.

24. Перельмутер А.В. Об оценке социальной компоненты риска // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 3. С. 23–25.

25. Elnashai A.S., Sarno L.D. Fundamentals of earthquake engineering. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

26. Перельмутер А.В., Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Махинько А.В., Пашинский В.А., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. М. : Изд-во «СКАД СОФТ» ; Изд-во «Ассоциации строительных вузов»; ДМК Пресс, 2020. 596 с.

27. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояний. М. : Изд-во «СКАД Софт» ; Издательский дом «АСВ», 2019. 240 с.

28. Смирнова Л.Н., Уздин А.М., Прокопович С.В. Некоторые особенности моделирования расчетных акселерограмм // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 1. С. 33–41.

29. Pirasteh A.A., Cherry J.L., Balling R.J. The use of optimization to construct critical accelerograms for given structures and sites // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1988. Vol. 16. Issue 4. Pp. 597–613. DOI: 10.1002/eqe.4290160410

Поступила в редакцию 7 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 10 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 11 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Анатолий Викторович Перельмутер — доктор технических наук, иностранный член РАСН, главный научный сотрудник; Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «СКАД Софт» (НПО «СКАД Софт»); Украина, 03037, г. Киев, ул. Освиты, д. 3а; РИНЦ ID: 579863, Scopus: 6602444316; AnatolyPerelmutter@gmail.com;

Олег Васильевич Кабанцев — доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 659725; ovk531@gmail.com.

REFERENCES

1. Dzhinchvelashvili G.A., Mkrtyichev O.V., Sosnin A.V. General provisions analysis of the seismic building design code SP 14.13330.2011 “SNiP II-7-81* Construction in seismic areas”. *Possible fundamental errors in design standards, leading to a deficit of seismic resistance of structures of 1-2 points : collection of works of the seminar. September 15, 2011.* Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2011; 19-27. (rus.).
2. Kurbatskiy E.N., Mazur G.Z., Mondrus V.L. Critical Analysis of Condition of the Normative Documents on Calculation of Structures for Earthquake. *ACADEMIA. Architecture and Construction.* 2017; 2:95-102. (rus.).
3. Mkrtyichev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. *Problems of nonlinearities in earthquake resistance theory (hypothesis and errors).* Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2014; 192. (rus.).
4. Kabantsev O.V., Useinov E.S., Sharipov Sh. Determination of allowable damage factor of antiseismic structures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2016; 2(55):117-129. (rus.).
5. Sosnin A.V. About refinement of the seismic-force-reduction factor (K1) and its coherence with the concept of seismic response modification in formulation of the spectrum method (in order of discussion). *Bulletin of Civil Engineers.* 2017; 1(60):92-114. (rus.).
6. Kurbatskiy E.N., Mondrus V.L. Dynamic coefficients or response spectra of structures to earthquake? *ACADEMIA. Architecture and Construction.* 2019; 1:107-114. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-107-114 (rus.).
7. Sosnin A.V. About dissipation properties of multi-storey rc frame buildings of large-scale-construction projects at their earthquake-resistance estimation. *Modern Science and Innovation.* 2017; 1:114-131. (rus.).
8. Tyapin A.G. “Dangerous directions of seismic excitation” in linear spectral analysis. *Earthquake Engineering. Constructions Safety.* 2019; 3:18-25. (rus.).
9. Tyapin A.G. Differences in seismic codes as potential ways for the development of civil codes. *Earthquake Engineering. Constructions Safety.* 2016; 1:29-32. (rus.).
10. Tyapin A.G. Some comments on the new generation of standards in earthquake engineering. Part I: General requirements and seismic input. Part II: seismic forces in linear-spectral method. *Earthquake Engineering. Constructions Safety.* 2019; 5:7-18. (rus.).
11. Uzdin A.M. The concept of the new codes of earthquake engineering. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures.* 2018; 1:14-18. (rus.).
12. Gurev V.V., Dorofeev V.M. Questions about the development of standards for the design of earthquake-resistant construction of a new generation. *Earthquake Engineering. Constructions Safety.* 2020; 4:20-23. (rus.).
13. Menon D., Prasad A.M., Varughese J.A. Seismic design philosophy: from force-based to displacement-based design. *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology.* 2018; 273-289. DOI: 10.1007/978-3-319-76855-7_13
14. Gunawan N., Han A., Gan B.S. Proposed design philosophy for seismic-resistant buildings. *Civil Engineering Dimension.* 2019; 21:1-5. DOI: 10.9744/ced.21.1.1-5
15. Takagi J., Wada A. Recent earthquakes and the need for a new philosophy for earthquake-resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2019; 119:499-507. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.11.024
16. Huen L.T.T. Brief comparison of seismic norms of Europe, Japan, Russia. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering].* 2009; 4:262-265. (rus.).
17. Shatomnaya A.M., Tarasov V.A., Barabash A.V., Zhuvak O.V., Ryibakov V.A. Russian and foreign standards of seismic design of buildings and structures. *Alfabuild.* 2018; 4(6) :92-114. (rus.).
18. Santos S.H.D.C., Zanaica L., Bucur C., Lima S.D.S. Comparative study of codes for seismic design of structures. *Mathematical Modelling in Civil Engineering.* 2013; 9(1) :1-12. DOI: 10.2478/mmce-2013-0001
19. Gordeev V.N., Perelmuter A.V. *Steel protective structures of the Chernobyl nuclear power plant.* Kiev, Publishing House “Steel”, 2020; 80. (rus.).
20. Mkrtyichev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Dzerzhinskiy R.I. Multilevel design philosophy in the light of provision earthquake resistance. *Geology and Geophysics of The South of Russia.* 2016; 1:71-78. (rus.).
21. Yue J. Multilevel seismic damage behavior correlation analysis for RC framed structures. *Advances in Materials Science and Engineering.* 2018; 2018:1-9. DOI: 10.1155/2018/2364297
22. Fathi-Fazl R., Lounis Z., Cai Z. Multicriteria and multilevel framework for seismic risk management of existing buildings in Canada. *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2020; 34(2):04020004. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001393

23. Uzdin A.M., Vorobev V.A., Bogdanova M.A., Sigidov V.V., Vanicheva S.S. *The economics of earthquake construction*. Moscow, FGPU DPO "Educational and methodological center for education in railway transport", 2017; 176. (rus.).
24. Perelmuter A.V. Assessment of the social component of risk. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2003; 3:23-25. (rus.).
25. Elnashai A.S., Sarno L.D. *Fundamentals of earthquake engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
26. Perelmuter A.V., Gordeev V.N., Lantuh-Lyaschenko A.I., Mahinko A.V., Pashinskiy V.A., Pichugin S.F. *Loads and impacts on buildings and structures* / ed. by A.V. Perelmuter. Moscow, Publishing house of SKAD SOFT, Publishing house of the Association of building universities, DMK Press, 2020; 596. (rus.).
27. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. *Fundamentals of the limit state method*. Moscow, Publishing house SKAD SOFT, Publishing House ASV, 2019; 240. (rus.).
28. Smirnova L.N., Uzdin A.M., Prokovich S.V. Some features of modeling design accelerograms. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2019; 1:33-41. (rus.).
29. Pirasteh A.A., Cherry J.L., Balling R.J. The use of optimization to construct critical accelerograms for given structures and sites. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1988; 16(4):597-613. DOI: 10.1002/eqe.4290160410

Received December 7, 2020.

Adopted in revised form on December 10, 2020.

Approved for publication on December 11, 2020.

BIONOTES: **Anatoly V. Perelmuter** — Doctor of Technical Sciences, Foreign member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Chief Researcher; **Scientific and Production Company "SCAD Soft" Ltd**; 3a Osvity st., Kiev, 03037, Ukraine; ID RISC: 579863, Scopus: 6602444316; AnatolyPerelmuter@gmail.com;

Oleg V. Kabantsev — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 659725; ovk531@gmail.com.

Расчет двухслойной составной балки, свободно лежащей на упругом основании

В.В. Филатов, Б.Ф. Кужин, Тхи Линь Куен Хоанг

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложена методика расчета двухслойных составных балок, лежащих на упругом основании. В качестве основания принята однопараметрическая модель Винклера. Работа двухслойных балок описывается теорией составных стержней А.Р. Ржаницына с абсолютно жесткими поперечными и упругоподатливыми продольными связями между слоями. Привлечение теории составных стержней позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) многослойных фундаментных балок, включающих слой пониженной теплопроводности, перфорированных балок.

Материалы и методы. Получение решения для данных задач в аналитическом виде представляет известные сложности, а зачастую не представляется возможным. Предлагается применить численный метод, метод последовательных аппроксимаций (МПА), разработанный на кафедре строительной и теоретической механики МГСУ профессором Р.Ф. Габбасовым МПА зарекомендовал себя как эффективный и высокоточный метод при расчете балок, плит и оболочек на статические, динамические нагрузки, при расчетах на устойчивость. По сравнению с разностными уравнениями «классического» метода конечных разностей (МКР) разностная форма МПА обладает рядом преимуществ. Рассматриваемая методика позволяет учитывать различные виды краевых условий без привлечения законтурных точек. В качестве нагрузок существует возможность учитывать сосредоточенные силы, сосредоточенные моменты, кусочно-распределенные нагрузки. Описывается алгоритм решения задачи. Система исходных дифференциальных уравнений решается с привлечением разностных аналогов. Приводятся типовые разностные уравнения для регулярных и краевых точек.

Результаты. В качестве иллюстрации предлагаемого подхода приведен пример расчета составной, свободно лежащей на упругом основании балки. Качество получаемых результатов контролируется выполнением численного исследования сходимости решения на нескольких вложенных одна в другую сетках.

Выводы. Предлагаемая методика может быть использована в инженерной практике проектных организаций и в учебном процессе высших учебных заведений строительного профиля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойные конструкции, теория составных стержней А.Р. Ржаницына, расчет балок на упругом основании, метод конечных разностей, метод последовательных аппроксимаций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Филатов В.В., Кужин Б.Ф., Тхи Линь Куен Хоанг. Расчет двухслойной составной балки, свободно лежащей на упругом основании // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1685–1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692

The analysis of a free two-layer composite beam on the elastic foundation

Vladimir V. Filatov, Bulat F. Kuzhin, Thi Linh Quyen Hoang

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

ABSTRACT

Introduction. This article offers a methodology for the analysis of a two-layer composite beam on an elastic foundation that represents a one-parameter Winkler model. The behaviour of two-layer beams is described by A.R. Rzhantsyn in his theory of composite rods that have rigid transverse and elastic-yielding longitudinal connections between layers. The theory of composite rods allows to study the stress-strain state (SSS) of multilayer foundation beams, having a layer featuring low thermal conductivity, and perforated beams.

Materials and methods. However, analytical solutions to these problems involve certain difficulties; therefore, they are often inapplicable. We propose to apply a numerical method, a method of successive approximations (MSA), developed by professor R.F. Gabbasov at the Department of structural and theoretical mechanics of the Moscow State University of Civil Engineering. MSA has proven to be an effective and highly accurate method designated for analyzing static/dynamic loads, applied to beams, slabs and shells, and for making stability calculations. The difference-based variation of the MSA method has a number of advantages over difference equations of the “classical” finite difference method (FDM). The proposed methodology allows to take into account various types of boundary conditions without involving contour points. Concentrated forces, concentrated moments, and piecewise distributed loads can be taken into account as loading types.

The article describes a problem solving algorithm. The system of initial differential equations is solved using difference analogs. Typical difference equations for regular and boundary points are provided.

Results. The analysis of a composite free-lying beam on an elastic foundation illustrates the proposed approach. The quality of the analysis results is controlled by performing a numerical study of the solution convergence using several nested meshes.

Conclusions. The proposed method can be used in the engineering practice of design organizations and the educational process of higher educational institutions training civil engineering specialists.

KEYWORDS: multilayer structures, A.R. Rzhanitsyn's theory of composite rods, analysis of beams on elastic foundation, finite difference method, method of successive approximations

FOR CITATION: Filatov V.V., Kuzhin B.F., Thi Linh Quyen Hoang. The analysis of a free two-layer composite beam on the elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1685-1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение в технике и строительстве, в частности, многослойных конструкций требует развития и совершенствования методов их расчета. При всем многообразии существующих расчетных методик, они являются достаточно сложными для использования в инженерной практике. Выгодно выделяется среди них теория составных стержней и пластин А.Р. Ржаницына [1]. В рамках этой теории слои, составляющие поперечное сечение конструкции, объединяются в пакет, посредством абсолютно жестких поперечных и упруго податливых продольных связей. Благодаря абсолютной жесткости поперечных связей, все слои обладают одинаковой формой изогнутой оси при деформировании конструкции. Способность продольных связей, заполняющих шов между слоями, сопротивляться взаимному сдвигу слоев, определяется коэффициентом жесткости шва на сдвиг. Проиллюстрировать влияние изменения значения этого коэффициента на работу составной конструкции можно следующим образом. При стремлении значения сдвиговой жесткости шва к бесконечности, составная конструкция пытается работать как монолитная, а при стремлении к нулю — как система, лишенная связей сдвига. При расчете строительных конструкций сдвиговая жесткость может быть определена в результате натурных или численных экспериментов, а для некоторых случаев по формулам [1].

Теория составных стержней используется при моделировании работы: многослойных деревянных [2–4], железобетонных конструкций [5–8], перфорированных металлических балок [9–11], каркасов зданий и сооружений и их элементов при расчете на статические и динамические нагрузки [12, 13]. Обзор работ по данной тематике, вышедших в свет до 1986 г., приведен в монографии [1]; обзор, не претендующий на полноту, вышедших после 1986 г., — в [14]. Не так много исследований посвящено расчету составных конструкций на упругом основании. Из недавно опубликованных можно привести работы [15, 16]. В них получено аналитическое решение для двухслойной составной балки, составленной из одинаковых слоев, контактирующей с винклеровским основанием. В первом случае была рассмотрена балка бесконечной длины, нагруженная сосредото-

ченной силой, во втором случае — полубесконечная составная балка, нагруженная сосредоточенным моментом.

Задачи по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) составных балок конечных размеров, нагруженных произвольной нагрузкой, с учетом различных краевых условий и отпора упругого основания, могут быть решены с привлечением численных методов. В числе методов, успешно применяемых в расчете конструкций на действие статических и динамических нагрузок на устойчивость, упомянем конечно-разностные методы: метод конечных разностей (МКР) в его классической форме [17–19], обобщенные уравнения МКР [20–24], метод последовательных аппроксимаций (МПА) [25–29]. В трудах [17–20, 25, 26, 29] учтена совместная работа конструкции и упругого основания, а в [26] мы уже обращались к вопросам расчета двухслойных составных балок на винклеровском основании, где решение построено с использованием разностной формы МПА [25]. Однако в указанной работе не рассмотрены балки, свободно лежащие на упругом основании. Кроме того, как и в исследованиях [15, 16], расчет был реализован для случая симметричного поперечного сечения. Обобщению методики расчета двухслойных составных балок несимметричного поперечного сечения при произвольных краевых условиях (в том числе свободных от закрепления краев) на произвольную нагрузку, контактирующих с упругим основанием, посвящена настоящая статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Запишем систему дифференциальных уравнений, описывающих работу двухслойной составной балки на винклеровском основании [14]:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -(q - ky); \quad (1)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{1}{\Sigma EI} (M - Tc); \quad (2)$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = -\xi \left[\frac{Mc}{\Sigma EI} - T \left(\frac{1}{E_{i+1} F_{i+1}} + \frac{1}{E_i F_i} - \frac{c^2}{\Sigma EI} \right) \right], \quad (3)$$

где M — суммарный изгибающий момент в сечении составной балки, лишенной связей сдвига; q —

внешняя распределенная нагрузка; k — коэффициент отпора упругого основания; y — прогиб (вертикальное перемещение сечения балки); x — координата, отсчитываемая вдоль оси балки; T — суммарное сдвигающее усилие в шве, накапливаемое по длине стержня от его начала до рассматриваемого сечения; c — расстояние между осями ветвей; ξ — коэффициент жесткости шва на сдвиг; E_i — модуль упругости материала i -ой ветви; F_i — площадь поперечного сечения i -ой ветви; I_i — момент инерции i -ой ветви.

Приближенное решение системы дифференциальных уравнений (1)–(3) может быть получено с привлечением разностных уравнений МПА [25]. Запишем их ниже, полагая, что k и ξ являются постоянными величинами, а T , y и их первые производные — неразрывными функциями.

$$\begin{aligned} {}^{\Pi}M_{i-1} - 2{}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1} + \Delta M_i + \tau P_i = \\ = -\frac{\tau^2}{12} \left[{}^{\Pi}q_{i-1} + 10{}^{\Pi}q_i + {}^{\Pi}q_{i+1} - \right. \\ \left. - k(y_{i-1} + 10y_i + y_{i+1}) - 5\Delta q_i \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1} = \\ = -\frac{\tau^2}{12} \left[a_1 ({}^{\Pi}M_{i-1} + 10{}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1}) - \right. \\ \left. - a_2 (T_{i-1} + 10T_i + T_{i+1}) - 5a_1 \Delta M_i - \tau a_1 P_i \right]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1} = \\ = -\frac{\tau^2}{12} \left[a_2 ({}^{\Pi}M_{i-1} + 10{}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1}) - \right. \\ \left. - a_3 (T_{i-1} + 10T_i + T_{i+1}) - 5a_1 \Delta M_i - \tau a_2 P_i \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (4)–(6) записаны на равномерной прямолинейной сетке с шагом τ (расстояние между соседними узлами расчетной сетки). В этих уравнениях:

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{1}{\Sigma EI}; \quad a_2 = \frac{c}{\Sigma EI} = a_1 c; \\ a_3 = \left(\frac{1}{E_{i+1} F_{i+1}} + \frac{1}{E_i F_i} + a_2 c \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta M_i = {}^{\Pi}M_i - {}^{\Pi}M_i$ — сосредоточенный момент, приложенный в точке i ; P_i — сосредоточенная сила, приложенная в точке i ; $\Delta q_i = {}^{\Pi}q_i - {}^{\Pi}q_i$ — скачок в значении равномерно распределенной нагрузки. Верхние индексы « Π » и « Π » обозначают, что данное значение взято бесконечно близко слева или справа от расчетной точки. Уравнения (4)–(6) записываются для всех регулярных точек, т.е. для всех, кроме краевых.

Уравнения для аппроксимации (1)–(3) в крайних точках покажем на примере крайней левой точки [10]:

$$\begin{aligned} -\tau {}^{\Pi}M'_i - {}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1} = \\ = -\frac{\tau^2}{12} \left[5{}^{\Pi}q_i + {}^{\Pi}q_{i+1} - k(5y_i + y_{i+1} + \tau y'_i) \right]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} -\tau y'_i - y_i + y_{i+1} = \\ = -\frac{\tau^2}{12} \left[a_1 (5{}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1} + \tau M'_i) - \right. \\ \left. - a_2 (5T_i + T_{i+1} + \tau T'_i) \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} -\tau T'_i - T_i + T_{i+1} = \\ = -\xi \frac{\tau^2}{12} \left[a_2 (5{}^{\Pi}M_i + {}^{\Pi}M_{i+1} + \tau M'_i) - \right. \\ \left. - a_3 (5T_i + T_{i+1} + \tau T'_i) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где $y' = \frac{dy}{dx}$; $M' = \frac{dM}{dx}$; $T' = \frac{dT}{dx}$.

Разностные уравнения для краевой точки можно получить «зеркальным» отображением (8)–(10) с изменением знака у первых производных искомых величин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим расчет двухслойной составной балки конечной длины, свободно лежащей на упругом основании.

В середине пролета она загружена сосредоточенной силой P (рис. 1).

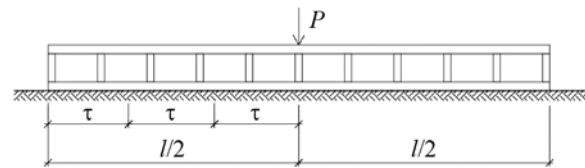


Рис. 1. Расчетная схема балки с обозначением шага расчетной сетки τ

Fig. 1. The beam design scheme where τ indicates mesh spacing

Поперечное сечение составной конструкции изображено на рис. 2, где введены следующие обозначения: $b_{н.в}$, $b_{в.в}$ — ширина нижней и верхней ветвей соответственно; $h_{н.в}$, $h_{в.в}$ — высота нижней и верхней ветвей; h_n — высота поперечного сечения планок, соединяющих ветви составного стержня; B — шаг соединяющих планок, вдоль оси балки.

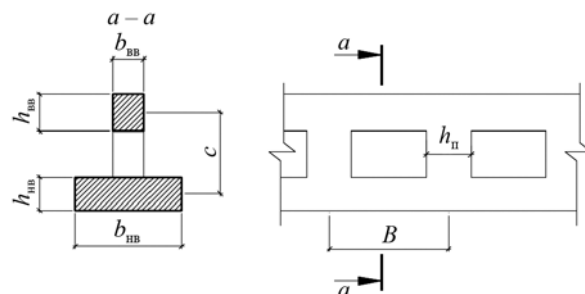


Рис. 2. Поперечное сечение составного стержня

Fig. 2. The cross-section of a composite rod

Если допустить, что ветви и соединяющие планки составной балки выполнены из одного ма-

Табл. 1. Результаты расчета на двух вложенных расчетных сетках

Table 1. Calculation results involving two nested meshes

x, м / m	y, м / m		M, кНм / kNm	
	$\tau = l/6 = 2 \text{ м / m}$	$\tau = l/12 = 1 \text{ м / m}$	$\tau = l/6 = 2 \text{ м / m}$	$\tau = l/12 = 1 \text{ м / m}$
0	$1,533 \cdot 10^{-4}$	$1,515 \cdot 10^{-4}$	0	0
2	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	2,668	2,656
4	$3,359 \cdot 10^{-3}$	$3,349 \cdot 10^{-3}$	19,057	19,058
6	$4,455 \cdot 10^{-3}$	$4,509 \cdot 10^{-3}$	61,986	62,031

териала $E_1 = E_2 = E_n = E$, то для определения величины коэффициента жесткости шва можно воспользоваться формулой (3.8) [1]:

$$\xi = \frac{12I_n E}{Bc^3} \frac{12I_1 I_2 / B^2 + I_n (I_1 + I_2) / Bc}{12I_1 I_2 / B^2 + 4I_n (I_1 + I_2) / Bc + I_n^2 / c^2}. \quad (11)$$

Зададимся следующими исходными данными:

$h_{n.b} = h_{b.b} = 0,2 \text{ м}$; $b_{n.b} = 0,4 \text{ м}$; $b_{b.b} = 0,2 \text{ м}$; $c = 0,4 \text{ м}$; $B = 1 \text{ м}$; $E = 2,7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Длина балки $l = 12 \text{ м}$.

Коэффициент постели по модели Винклера $k_f = 5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^3$. При ширине подошвы нижнего слоя коэффициент отпора упругого основания $k = k_f b_{n.b} = 2 \text{ МПа}$.

Внешняя нагрузка $P = 60 \text{ кН}$.

Перед началом расчета на ось балки наносится расчетная сетка. Узлы сетки с шагом τ условно показаны на рис. 1. Для внутренних узлов сетки записываются уравнения (4)–(6). Для двух внешних — (8)–(10). Последние записываются с учетом условий на свободном краю балки [1]: $M = 0$; $M' = 0$; $T = 0$.

В табл. 1 приведены результаты расчета, полученные на двух вложенных сетках при $\tau = \frac{l}{6} = 2 \text{ м}$ и $\tau = \frac{l}{12} = 1 \text{ м}$.

Выполним интегральную проверку равновесия действующих на балку сил. Это условие можно записать в следующем виде:

$$P - k\Omega_y = 0, \quad (12)$$

где Ω_y — площадь эпюры прогибов, величина которой может быть определена с помощью формулы численного интегрирования Симпсона. При шаге расчетной сетки τ , для участка эпюры длиной 2τ ее удобно представить так:

$$\Omega_y = \frac{\tau}{3} (y_{i-1} + 4y_i + y_{i+1}). \quad (13)$$

При шаге $\tau = l/6$ значение отпора упругого основания составляет 60,319 кН (относительная погрешность 0,53 %), а при $\tau = l/12$ — 59,957 кН (0,07 %).

Воспользовавшись известными выражениями метода начальных параметров, можно определить значения максимального изгибающего момента и максимального прогиба для монолитной балки.

Причем поперечное сечение монолитной балки рассмотрим в двух вариантах. В первом случае, как две ветви, лишенные связей сдвига между собой. Во втором случае ветви абсолютно жестко связаны между собой и их взаимный сдвиг исключен. Это позволит качественно оценить результаты, полученные численно по теории А.Р. Ржаницына. В табл. 2 во втором столбце приведены результаты для балки, лишенной связей сдвига, в третьем — получены по описываемой выше методике для составной балки, и в последнем — для балки, ветви которой связаны абсолютно жестко. Как и следовало ожидать, наши результаты оказались между пограничными значениями, но ближе к монолитной балке. Авторы работы [15] указывают: «При $\xi/E > 1$ работа составной балки приближается к работе монолитной балки».

Табл. 2. Сводная таблица результатов расчета балок монолитной, составной и лишенной связей сдвига системы

Table 2. The consolidated table of calculation results for monolithic, composite and shear-free beams

Показатель Indicator	Система, лишенная связей сдвига Shear-free system	Составная балка по теории А.Р. Ржаницына Composite beam made pursuant to the A.R. Rzhnitsyn's theory	Монолитная балка Monolithic beam
$y_{\max}, \text{ м / m}$	$7,07 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$4,11 \cdot 10^{-3}$
$M_{\max}, \text{ кНм / kNm}$	31,991	62,031	65,070

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная методика позволяет достаточно просто исследовать НДС двухслойных составных балок конечной длины, контактирующих с упругим основанием. В качестве внешних нагрузок возможно учитывать: сосредоточенные силы; сосредоточенные моменты; кусочно-постоянные нагрузки, распределенные на отдельных участках балки по ее длине. Без привлечения законтурных точек моделируются краевые условия: шарнирное опирание,

жесткая заделка, упруго-податливая опора, свободный от закреплений край.

В качестве перспективных направлений развития методики можно указать следующее.

Для однопараметрической модели упругого основания алгоритм расчета может быть обобщен на случай переменного по длине конструкции коэффициента отпора k .

В работе [29] рассмотрен расчет двухслойной составной балки на упругом основании, описываемой двухпараметрической моделью В.З. Власова, Н.Н. Леонтьева. Однако приведенные уравнения позволяют учитывать только равномерно распределенную по всей длине конструкции нагрузку.

Целесообразно предусмотреть возможность учета разрывных нагрузок, таких как: сосредоточенные силы, сосредоточенные моменты, кусочно-постоянные распределенные нагрузки.

Представляет интерес распространение рассматриваемой методики на расчет конструкций с привлечением других, не рассмотренных в исследованиях [14, 25, 29] моделей упругого основания.

Еще одним интересным направлением является применение теории составных стержней (ТСС) к определению НДС системы «здание – фундамент – основание». Подобный подход, но без привлечения ТСС, реализован в труде [30].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
2. Краснощеков Ю.В. Применение модели составного стержня для расчета деревоплиты из склеенных досок // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2009. № 4 (14). С. 28–32.
3. Linkov V.I. The effect of humidity on the operation of wooden beams of a composite section on compliant couplings without the use of glue // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 02033. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102033
4. Линьков Н.В. Расчет деревянных балок составного сечения на соединениях с применением композиционного материала по теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 4. С. 20–22.
5. Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета. М.: Изд-во АСВ, 2001. 255 с.
6. Колчунов В.И., Марьенков Н.Г., Омельченко Е.В., Тугай Т.В., Бухтиярова А.С. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. С. 12–15.
7. Фардиев Р.Ф., Ашрапов А.Х. Применение теории составных стержней к определению характера распределения напряжений в поперечном сечении усиленного внецентренно сжатого элемента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (34). С. 363–369.
8. Балушкин А.Л. Применение модели составного стержня для прогнозирования предельных состояний эксплуатируемых железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 44–49.
9. Притыкин А.И. Применение теории составных стержней к определению деформаций перфорированных балок // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 177–181.
10. Притыкин А.И., Лаврова А.С. Прогибы перфорированных балок с круглыми вырезами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 94–102.
11. Pritykin A.I. The castellated beams deflections calculated with theory of composed bars // Mechanics. 2015. Vol. 21. Issue 5. DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.12181
12. Mansour A.E.-D., Filatov V., Gandzhuntsev M., Rysany N. Numerical verification of composite rods theory on multi-story buildings analysis // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 33. P. 02077. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302077
13. Filatov V.V., Rysany N. A numerical algorithm for solving a two-layered composite beam subjected to vibrational loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042065. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042065
14. Габбасов Р.Ф., Филатов В.В. Численный метод расчета составных стержней и пластин с абсолютно жесткими поперечными связями. М.: Изд-во АСВ, 2014. 200 с.
15. Леонтьев А.Н., Леонтьева А.Г. Расчет бесконечно длинной составной балки, расположенной на упругом основании // Вестник МГСУ. 2010. № 4–3. С. 167–172.
16. Атаров Н.М., Леонтьев А.Н., Леонтьева А.Г. Изгиб составной балки, расположенной на упругом основании // Вестник МГСУ. 2011. № 4. С. 212.
17. Юрьев А.Г., Рубанов В.Г., Горшков А.С. Расчет многослойных плит на упругом основании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 51–59.
18. Андреев В.И., Барменкова Е.В., Матвеева А.В. Расчет плит переменной жесткости на упругом основании методом конечных разностей // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 31–39. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.31-39

19. Демченко Д.Б., Маяцкая И.А., Полисмаков А.И. Численная реализация задачи об изгибе балки-полосы на упругом основании методом конечных разностей // Молодой исследователь Дона. 2017. № 2 (5). С. 81–94.

20. Габбасов Р.Ф., Уварова Н.Б. Применение обобщенных уравнений метода конечных разностей к расчету плит на упругом основании // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 102–107. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.4.102-107

21. Gabbasov R.F., Filatov V.V., Ovarova N.B., Mansour A.M. Dissection method applications for complex shaped membranes and plates // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 444–449. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.150

22. Gabbasov R., Gandzhuntsev M., Filatov V., Muniev D., Mansour A.E.-D. A numerical solution for plain problems of theory of elasticity // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 04015. DOI: 10.1051/mateconf/201710604015

23. Uvarova N.B., Gabbasov R.F. Calculation of plates in a geometrically nonlinear setting with the use of generalized equations of finite difference method // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 01024. DOI: 10.1051/mateconf/201819601024

24. Mansour A.E.-D. Generalized finite difference approach verification on circular plates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineer-

ing. 2018. Vol. 365. P. 042030. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042030

25. Габбасов Р.Ф., Габбасов А.Р., Филатов В.В. Численное построение разрывных решений задач строительной механики. М.: Изд-во АСВ, 2008. 277 с.

26. Филатов В.В. К расчету составных балок на упругом основании // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 73–76.

27. Габбасов Р.Ф., Филатов В.В., Александровский М.В. Применение уравнений МПА к решению задач устойчивости основных конструктивных элементов зданий и сооружений текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3 (369). С. 208–212.

28. Mansour A.M., Gabbasov R., Filatov V. A numerical solution for geometrically nonlinear bending plates problems subjected to local-loads // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00115. DOI: 10.1051/mateconf/201711700115

29. Филатов В.В. О расчете составных балок на упругом основании с двумя коэффициентами постели // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 3. С. 38–40.

30. Андреев В.И., Барменкова Е.В. Моделирование реальной системы «Здание – фундамент – основание» двухслойной балкой переменной жесткости на упругом основании // Вестник МГСУ. 2012. № 6. С. 37–41. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.6.37-41

Поступила в редакцию 9 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 21 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Владимирович Филатов — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4433-9609; stroitmeh@mgsu.ru;

Булат Фаргатович Кужин — аспирант кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 890867; stroitmeh@mgsu.ru;

Тхи Линь Куен Хоанг — аспирант кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; stroitmeh@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Rzhnitsyn A.R. *Composite rods and plates*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 316. (rus.).

2. Krasnoshchyokov U.V. Application of the composite rod model for the calculation of wood boards from glued boards. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2009; 4(14):28-32. (rus.).

3. Linkov V.I. The effect of humidity on the operation of wooden beams of a composite section on

compliant couplings without the use of glue. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:02033. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199102033

4. Linkov N.V. Calculation of wooden beams of composite section, connections of which are made of a composite material according to the theory of built-up bars of A.R. Rzhnitsyn. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 4:20-22. (rus.).

5. Korol E.A. *Three-layer enclosing reinforced concrete structures made of light concrete and features of their calculation*. Moscow, ASV Publishing house, 2001; 255. (rus.).
6. Kolchunov V.I., Mar'enkova N.G., Omel'chenko E.V., Tugaj T.V., Buhtiyarova A.S. Methods for determining the stiffness of planar stressed and frame reinforced concrete composite structures under seismic actions. *Industrial and Civil Engineering*. 2014. 2:12-15. (rus.).
7. Fardiev R.F., Ashrapov A.H. Application of the theory of compound bars for the assessment of stress pattern in the cross section of a strengthened beam column. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015; 4:363-369. (rus.).
8. Balushkin A.L. Usage of built-up bar model for forecasting ultimate conditions of exploited reinforced concrete structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 1(26):44-49. (rus.).
9. Pritykin A.I. Application of the theory of composite rods to the determination of deformations of perforated beams. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 4:177-181. (rus.).
10. Pritykin A.I., Lavrova A.S. Deflections of perforated beams with circular openings. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2015; 3:94-102. (rus.).
11. Pritykin A.I. The castellated beams deflections calculated with theory of composed bars. *Mechanics*. 2015; 21(5). DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.12181
12. Mansour A.E.-D., Filatov V., Gandzhuntsev M., Rysany N. Numerical verification of composite rods theory on multi-story buildings analysis. *E3S Web of Conferences*. 2017; 33:02077. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302077
13. Filatov V.V., Rysany N. A numerical algorithm for solving a two-layered composite beam subjected to vibrational loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042065. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042065
14. Gabbasov R.F., Filatov V.V. *Numerical method for calculating composite rods and plates with absolutely rigid cross-links*. Moscow, ASV publishing house, 2014; 200. (rus.).
15. Leontiev A.N., Leontieva I.G. Analysis of an infinite composite beam located on elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-3:167-172. (rus.).
16. Atarov N.M., Leontiev A.N., Leontieva I.G. Analysis of an composite beam located on elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 4:212. (rus.).
17. Yur'ev A.G., Rubanov V.G., Gorshkov A.S. Calculation of multilayer plates on an elastic base. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2007; 1:51-59. (rus.).
18. Andreev V.I., Barmenkova E.V., Matveeva A.V. Calculation of plates with variable rigidity on elastic basis by finite difference method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 12:31-39. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.31-39 (rus.).
19. Demchenko D.B., Mayatskaya I.A., Polismakov A.I. Numerical realization of bending problem for the beam-strip on an elastic foundation using the method of finite differences. *Young Don Researcher*. 2017; 2:81-84. (rus.).
20. Gabbasov R.F., Uvarova N.B. Application of generalized equations of the finite difference method as part of the analysis of slabs resting on elastic foundations. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 4:102-107. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.4.102-107 (rus.).
21. Gabbasov R.F., Filatov V.V., Ovarova N.B., Mansour A.M. Dissection method applications for complex shaped membranes and plates. *Procedia Engineering*. 2016; 153:444-449. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.150
22. Gabbasov R., Gandzhuntsev M., Filatov V., Muniev D., Mansour A.E.-D. A numerical solution for plain problems of theory of elasticity. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:04015. DOI: 10.1051/matec-conf/201710604015
23. Uvarova N.B., Gabbasov R.F. Calculation of plates in a geometrically nonlinear setting with the use of generalized equations of finite difference method. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:01024. DOI: 10.1051/matecconf/201819601024
24. Mansour A.E.-D. Generalized finite difference approach verification on circular plates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042030. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042030
25. Gabbasov R.F., Gabbasov A.R., Filatov V.V. *Numerical construction of discontinuous solutions to structural mechanics problems*. Moscow, ASV publishing house, 2008; 277. (rus.).
26. Filatov V.V. About calculation of composite beams on an elastic base. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 4:73-76. (rus.).
27. Gabbasov R.F., Filatov V.V., Aleksandrovsky M.V. The application of successive approximations method on solving stability problems of main structural elements of textile industry structures and buildings. *Proceedings of Higher Educa-*

tion Institutions. *Textile Industry Technology*. 2017; 3(369):208-212. (rus.).

28. Mansour A.M., Gabbasov R., Filatov V. A numerical solution for geometrically nonlinear bending plates problems subjected to local-loads. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00115. DOI: 10.1051/matec-conf/201711700115

29. Filatov V.V. On the calculation of composite beams on two-parameter elastic foundations. *Structural*

Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2010; 3:38-40. (rus.).

30. Andreev V.I., Barmenkova E.V. Modeling of the real system «structure-foundation-bedding» through the employment of a model of a two-layer beam of variable rigidity resting on the. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 6:37-41. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.6.37-41 (rus.).

Received December 9, 2020.

Adopted in revised form on December 18, 2020.

Approved for publication on December 21, 2020.

B I O N O T E S: **Vladimir V. Filatov** — Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4433-9609; stroitmeh@mgsu.ru;

Bulat F. Kuzhin — postgraduate student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890867; stroitmeh@mgsu.ru;

Thi Linh Quyen Hoang — postgraduate student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; stroitmeh@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 33:69

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1693-1707

Обоснование планируемой стоимости инвестиционно-строительных проектов

П.А. Журавлев¹, А.М. Марукян²

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

² ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Оценка инвестиционной стоимости, принятие инвестиционных решений, успешная реализация инвестиционно-строительных проектов (ИСП) на всех стадиях жизненного цикла зависит от качественного технико-экономического обоснования бюджетных инвестиций. Цель работы — обоснование бюджетных инвестиций (расчет предполагаемой (предельной) стоимости) посредством моделирования и приведения показателей стоимости соответствующих видов работ объектов-аналогов к требуемым показателям мощности или видам работ, указанным в задании на проектирование или в предпроектной документации.

Материалы и методы. Проведен анализ технических требований и условий, влияющих на формирование предпроектных решений (проработок), как следствие, на возможность и целесообразность реализации предполагаемого ИСП. Расчет предполагаемой (предельной) стоимости объекта строительства, выполняемый в рамках разработки документации обоснования бюджетных инвестиций, осуществляется в соответствии с установленными административно-территориальными, организационными, техническими и технологическими предпроектными решениями и вариантными проработками и реализуется на основе моделирования стоимостных показателей и видов работ объекта-аналога.

Результаты. Обоснование бюджетных инвестиций представлено примером расчета предполагаемой (предельной) стоимости, выполненным с использованием показателей стоимости и видов работ объекта-аналога и учетом особенностей и требований, установленных заданием на проектирование и предпроектной документацией.

Выводы. Значимость проведенного исследования состоит в практическом применении процесса моделирования стоимостных показателей объектов-аналогов при формировании документации по обоснованию инвестиций, оценке инвестиционной стоимости и принятию организационно-технологических решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технико-экономическое обоснование инвестиций, требования к подготовке предпроектных исследований инвестиционно-строительных проектов, обоснование инвестиций объектов капитального строительства, моделирование стоимости инвестиционно-строительных проектов, предполагаемая (предельная) стоимость, показатели стоимости объектов-аналогов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Журавлев П.А., Марукян А.М. Обоснование планируемой стоимости инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1693–1707. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1693-1707

Substantiation of projected costs of investment and construction projects

Pavel A. Zhuravlev¹, Artur M. Marukyan²

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

² STROYGAZMONTAZH LLC; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Investment value assessment, investment decision making, and successful implementation of investment and construction projects at all stages of their life cycles depend on high-quality feasibility studies focused on budget investments. The purpose of the work is to substantiate budget investments (calculation of the estimated (marginal) cost) by means of modeling and ensuring the compliance between the cost of similar types of work at other construction facilities and requested capacity values or types of work specified in design assignments or preliminary project documentation packages.

Materials and methods. The co-authors analyzed the technical requirements and conditions affecting pre-project solutions (engineering studies), as well as the feasibility and expediency of the project implementation. The calculation of projected (marginal) project costs performed to substantiate budget investments in accordance with established administrative/territorial, organizational, technical and technological pre-design solutions and alternative engineering options, is implemented by means of modeling the costs to be incurred and assignments fulfilled at a similar construction facility.

Results. Budget investments are substantiated by the analysis of the estimated (marginal) cost, performed on the basis of cost parameters and types of works performed at a similar construction facility and with regard for the features and requirements set in the design assignment and pre-project documentation.

Conclusions. The significance of the research project consists in the practical application of the process of modeling the cost of similar construction facilities in the course of compiling a package of documents to substantiate the investments to be made, assess the investment value and make a contribution to investment decision making.

KEYWORDS: investment feasibility study, requirements applicable to pre-project studies of investment and construction projects, substantiation of investments into capital construction facilities, simulation of the cost of investment construction projects, estimated (marginal) cost, cost of similar construction facilities

FOR CITATION: Zhuravlev P.A., Marukyan A.M. Substantiation of projected costs of investment and construction projects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1693-1707. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1693-1707 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Инвестиции являются основным фактором, обеспечивающим развитие государства [1–5].

Согласно прогнозу долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 г., разработанному Минэкономразвития России, отраслевая структура инвестиций в основной капитал предполагает значительные объемы инвестирования в строительство (около 26 %), транспортную инфраструктуру (около 16 %), топливно-энергетический комплекс (около 15 %), машиностроение и связь (около 10 %).

В настоящее время реализуемая государством модель активизирования экономического роста посредством инвестиционных проектов требует совершенствования процесса принятия организационно-технологических решений в ситуации ограниченности бюджетных и дополнительно привлекаемых ресурсов и рационального, оправданного отбора инвестиционных проектов [6].

Бюджетные инвестиции в строительство предусматриваются соответствующими бюджетами бюджетной системы в интересах реализации федеральных и региональных целевых программ. Финансирование федеральных целевых и федеральных адресных инвестиционных программ осуществляется по целевому принципу согласно утвержденным объемам финансирования и соответствующим перечням программ.

Зачастую среди общих недостатков, встречающихся при передаче проектной документации на экспертизу и влияющих на ее качество, можно отметить недостаточность и неосновательность проработки проектных решений по объему представленных материалов (решения технически возможны, но не оптимальны), отсутствие утвержденных технических условий, отсутствие в необходимом и достаточном объеме инженерно-экологических изысканий. Как следствие, возникают конкретные вопросы целесообразности и рациональности строительства объектов на выбранных территориях, вариативности закладываемых проектных решений, взвешенности основных технико-экономических показателей с соответствующими аналогами, в целях подтверждения обоснованности сметной стоимости, рацио-

нальности расхода основных строительных материалов, времени эксплуатации строительных машин, трудовых и других затрат по сравнению с аналогами [7–10].

В этой связи законодательством Российской Федерации предусмотрены мероприятия по введению в бюджетный процесс механизма обоснования инвестиций в целях формирования оптимальных проектных решений по объектам капитального строительства (ОКС), выполненных на основе моделирования, сравнения вариантов строительства и анализа технических возможностей предполагаемых работ, определения их достоверной стоимости, а также экономической целесообразности бюджетных инвестиций.

Процедура разработки обоснования инвестиционного процесса зависит от масштабности запланированных к реализации инвестиционных проектов, чем крупнее и масштабнее инвестиционный проект, тем процедура обоснования инвестиции будет охватывать большее количество условий, факторов и критериев, подлежащих анализу.

Таким образом, неверная оценка инвестиционной стоимости на этапе планирования и принятия решения об инвестициях в проект может привести к ситуации недофинансирования объекта, увеличению продолжительности строительства, срыву сроков его реализации, а также отказу от проведения строительных работ и заморозке объекта [11, 12].

Качественное обоснование инвестиций позволяет инвестору (распорядителю бюджетных средств) по результатам комплексной проработки инвестиционного проекта совместно с техническим заказчиком видеть, понимать и определять оптимальные параметры (показатели мощности) предполагаемого инвестиционного проекта, мощность и стоимость основного и вспомогательного устанавливаемого оборудования, возможность и способ подключения ко всем инженерным сетям и коммуникациям, планируемое территориальное место размещения объекта, его строительные, технологические и компоновочные решения, ресурсообеспечение строительного производства, строительномонтажных работ, а также сроки окупаемости [13].

При этом наличие заключения по обоснованию инвестиций в объект строительства, а также заклю-

чения по результатам проведенного технологического и ценового аудита обоснования инвестиций является обязательным требованием при заключении государственных контрактов, в соответствии с которыми одновременно осуществляется выполнение работ по проектированию, строительству и вводу объектов в эксплуатацию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Важная роль в разработке документации по обоснованию инвестиций, состоящей из текстовой и графических частей, отводится проекту задания на проектирование, в котором будут сконцентрированы основные требования и условия предполагаемого инвестиционного проекта. Градостроительные условия и ограничения служат базой для формирования исходных данных, именно на их основании с учетом технических условий составляется техническое задание на проектирование.

Выработка основных требований и условий реализации предполагаемого инвестиционного проекта осуществляется в процессе предпроектных исследований. Предпроектные проработки позволяют собрать максимум сведений об объекте предполагаемого строительства или реконструкции; оценить (определить) возможность проведения предполагаемых работ в конкретных условиях; выявить возможные потенциальные угрозы, проблемы и риски реализации проекта; определить затраты на решение возможных, возникших в процессе ведения работ проблем и стоимость реализации проекта.

Одно из условий технической возможности и целесообразности реализации проекта — выбор оптимального участка (площадки, места) размещения и строительства объекта [14]. Будущее размещение (расположение) на ситуационном плане предполагаемого объекта устанавливает его территориальное положение на местности, расположение по отношению к ландшафту, а также связь с коммуникационными сетями, путями транспортного сообщения и предопределяется следующими основными ограничениями:

- предельной высотой здания;
- максимально допустимым процентом застройки земельного участка;
- максимально допустимой плотностью населения (для жилой застройки);
- минимально допустимыми расстояниями от проектируемых объектов до существующих зданий и сооружений;
- охраняемыми зонами инженерных коммуникаций;
- зонами с особыми условиями использования территорий;
- требованиями к необходимости проведения инженерных изысканий;

- требованиями по благоустройству;
- обеспечением условий транспортно-пешеходной связи;
- требованиями о наличии мест для постоянного хранения автотранспорта;
- требованиями по охране культурного наследия;
- требованиями по архитектурным и инженерным решениям.

Ввиду того, что естественные условия строительства оказывают существенное влияние на выбор конструкций фундамента, конструктивных схем здания и параметров сооружения, большое внимание уделяется сбору и анализу данных о естественных природных условиях площадки строительства, включая: метеоусловия (температура, влажность, количество осадков, скорость ветра и др.); геологические условия и гидрологические сведения (особое внимание уделяется грунтовым условиям, физико-химическим свойствам и характеристикам поверхностных и подземных вод); геоморфологические условия и ландшафт; экологические условия. Это позволит принять решение о принципиальной пригодности использования земельного участка в целях строительства конкретного объекта.

Предпроектная подготовка с учетом оценки имеющихся условий строительства включает переход от требований технических характеристик объекта (общей площади, емкости, вместимости, количества этажей, высоты здания), территориальных потребностей (площади застройки) к принятию принципиальных конструктивных, архитектурных и объемно-пространственных технологических решений, установлению сведений об основном технологическом оборудовании, инженерном оборудовании, о сетях инженерно-технического обеспечения и инженерно-технических решениях, а также организационно-технологических схем строительства.

Необходимо выделить, что материалы, обосновывающие проектные решения, должны содержать исчерпывающую информацию о воздействии объекта на окружающую среду при его строительстве и эксплуатации.

Следует отметить, что предпроектная проработка инвестиционно-строительного проекта (ИСП) учитывает возможные затраты (при необходимости) при выборе (определении) площадки строительства, на подготовку территории строительства (вырубка зеленых насаждений, снос и демонтаж зданий и строений), снятие и хранение плодородного слоя почвы (временное складирование), транспортировку, вывоз излишков грунта, его размещение и утилизацию, вынос инженерных сетей из зоны строительства, необходимость устройства подпорных стен и удерживающих сооружений, разработку мероприятий инженерной защиты территории от опасных природных процессов.

С учетом вышеуказанных требований вариантное проектирование (моделирование) ИСП предполагает поиск оптимального и рационального варианта проектного предложения для исключения возможных ошибок, а также экономический анализ различных подходов [15–19]. Типичным затруднением, возникающим в профессиональной деятельности участников инвестиционного процесса, является потребность в быстрой и в то же время точной оценке размера предстоящих затрат уже на предпроектной стадии строительства, еще до разработки проектной документации, для определения предполагаемой (предельной) стоимости строительства [20, 21].

Принимая во внимание незначительную иллюстрацию практическими примерами формирования документации по управлению и технико-экономическому обоснованию инвестиций, комплексное рассмотрение алгоритма факторного моделирования стоимости ИСП имеет большую актуальность.

Особенность алгоритма факторного моделирования стоимости ИСП в целях формирования расчетных обоснований предполагаемой (предельной) стоимости ОКС — вариативность решений, выражаемая в возможности комбинирования (конфигурирования) стоимостных показателей различных конструктивных решений и видов работ объектов-аналогов [22, 23].

Моделирование стоимости инвестиционных проектов проводится на основании анализа стоимостных показателей проектной документации объектов-аналогов, к выбору которой предъявляются следующие требования:

- подбор проектной документации осуществляется по объектам, аналогичным по наименованию, функциональному назначению, по принципу максимального соответствия технико-экономических показателей, конструктивных характеристик объекта инвестиционного строительства, организационно-технологическим, природно-климатическим, инженерно-геологическим и иным условиям территории, на которой планируется строительство;
- наличие положительного заключения государственной экспертизы проектной документации;
- наличие в составе сметной документации, имеющей положительное заключение о достоверности определения сметной стоимости.

По результатам анализа проектно-сметной документации объекта-аналога в зависимости от назначения зданий и сооружений, архитектурных, объемно-планировочных, организационно-технологических и конструктивных решений принимаются измерители показателей стоимости. Одним из требований выбора измерителей показателей стоимости является

доступность расчетов с их применением для определения предполагаемой стоимости строительства.

В случае отсутствия в выбранном объекте-аналоге соответствующих видов или комплексов работ и затрат в целях максимального приближения его характеристик к характеристикам инвестиционного проекта могут быть использованы дополнительно отобранные объекты-аналоги, из состава проектно-сметной документации которых используются требуемые комплексы и виды работ и затрат, указанные в задании на проектирование и в предпроектной документации.

К примеру, при отличии конструктивной части фундамента объекта-аналога, принятого в целях обоснования предполагаемой (предельной) стоимости ОКС, могут быть использованы данные о показателях стоимости устройства конструкций фундаментов объектов, аналогичных по назначению, проектной мощности, природно-климатическим, инженерно-геологическим и иным условиям территории, на которой планируется осуществлять строительство, с последующим их пересчетом.

Аналогичным образом, в расчете предполагаемой стоимости могут быть учтены (откорректированы) затраты на приобретение и монтаж оборудования, перебазировку техники, доставку материалов и др.

Учитывая изложенное, моделирование стоимости инвестиционно-строительного процесса позволяет качественно обосновать предполагаемую (предельную) стоимость ОКС на предпроектной стадии, осуществить планирование ресурсов для достижения конечной цели.

На примере объекта представлен процесс моделирования стоимости инвестиционного проекта с использованием данных сметной документации (локальных, объектных и сводных сметных расчетов), а также выполнение расчета с применением показателей стоимости строительства объекта-аналога, видов работ, выведенных на единицу измерения (единицу мощности).

Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ОКС осуществляется путем приведения и соответствующим пересчетом показателей стоимости строительства соответствующих видов работ объекта-аналога к требуемым показателям мощности или видов работ объекта инвестиционного строительства, указанных в задании на проектирование и предпроектной документации (проектных решениях).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование бюджетных инвестиций представлено примером расчета предполагаемой (предельной) стоимости ИСП на выполнение инженерных

изысканий, проектирование и строительство ОКС («Многokвартирный жилой дом, г. Севастополь»).

Расчет предполагаемой (предельной) стоимости выполнен с применением моделирования стоимости ИСП на основе показателей стоимости и видов работ объекта-аналога. В качестве объекта-аналога используется объект «Проектирование, строительство жилого дома. Республика Крым. Городской округ Ялта», имеющий положительное заключение государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий, а также положительное заключение государственной экспертизы по проверке достоверности определения сметной стоимости. Моделирование стоимости ИСП осуществлено для следующих основных характерных особенностей, требований и объемов работ моделируемого объекта (в пределах отклонения в размере 30 % от объемов работ объекта-аналога), установленных заданием на проектирование и предпроектной документации:

- характерные особенности — жилой дом коридорного типа;
- характеристика территории строительства (возможность опасных природных процессов и явлений и техногенных воздействий на территории) — сейсмичность 8 баллов, обвально-осыпные и оползневые процессы;
- типы квартир — одно-, двух-, трехкомнатные;
- количество этажей — 17, в том числе надземных — 16;
- общее количество квартир — 294 шт.;
- общая площадь здания — 18 857,8 м²;
- конструктивная схема здания — каркасная;
- каркас здания — железобетонный монолитный;
- фундамент — железобетонный свайный;
- общая площадь квартир с учетом летних помещений — 11 652,14 м²;
- площадь квартир без учета летних помещений — 10 965,33 м²;
- площадь нежилых помещений — 2 868,42 м²;
- площадь проезжей части — 3 585,4 м²;
- площадь отмостки — 180,7 м²;
- площадь тротуаров — 757,9 м²;
- площадь площадок — 912,6 м²;
- площадь озеленения — 2 740,53 м².

Выбор объекта-аналога проведен с учетом функционального назначения планируемого к строительству объекта, его технических, мощностных и конструктивных характеристик.

Объект-аналог имеет следующие основные технико-экономические показатели:

количество этажей — 13, в том числе надземных — 12;

- общее количество квартир — 226 шт.;
- площадь жилого здания — 14 506,7 м²;
- общая площадь квартир с учетом летних помещений — 8 963,19 м²;
- площадь квартир без учета летних помещений — 8 434,87 м²;
- площадь нежилых помещений — 2 206,48 м²;
- площадь проезжей части — 2 758 м²;
- площадь отмостки — 139 м²;
- площадь тротуаров — 583 м²;
- площадь площадок — 702 м²;
- площадь озеленения — 2 108,1 м².

Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП на выполнение инженерных изысканий, проектирование и строительство объекта «Многokвартирный жилой дом, г. Севастополь» выполнен на примере объекта-аналога «Проектирование, строительство жилого дома. Республика Крым. Городской округ Ялта» с учетом устройства внутренних инженерных систем жизнеобеспечения и приведен в таблице.

Согласно положительному заключению государственной экспертизы по проверке достоверности определения сметной стоимости объекта-аналога, стоимость работ (инженерных изысканий, проектирование и строительство) в уровне цен 2018 г. составляет 743 734,85 тыс. руб., включая НДС (ставка 18 %).

Показатели стоимости видов работ рассчитаны на единицу измерения (мощности) для объекта-аналога (табл.).

Показатели стоимости работ по демонтажу существующих зданий и сооружений, а также внутри площадной сети канализации объекта-аналога не учитываются.

Конструктивные решения подземной и надземной части, конструктивы заполнения проемов, внутренняя отделка, наружная отделка, внутренние системы инженерного обеспечения объекта-аналога укрупнены.

Конструктивные решения подземной части объекта-аналога (п. 3 табл.) включают устройство:

- фундамента свайного из свай БНС диаметром 800 мм, длиной до 25,35 м.п.;
- монолитного железобетонного плитного ростверка, толщиной 800 мм;
- стен подвала монолитных железобетонных: внутренних толщиной 300 мм, наружных толщиной 250 мм с гидроизоляцией;
- перекрытия над подвалом монолитного железобетонного, толщиной 200 мм;

- лестницы спуска в подвал монолитной железобетонной, толщиной 160 мм;
- площадки крыльца, толщиной 200 мм.

Конструктивные решения надземной части объекта-аналога (п. 4 табл.) включают устройство:

- монолитных железобетонных стен и перегородок, плит перекрытий маршей и площадок толщиной 200 мм;
- лифтовой шахты, толщиной 150 мм.

Конструктивы заполнения проемов объекта-аналога (п. 9 табл.) включают устройство:

- балконных дверей и окон из ПВХ однокамерных, подоконных досок, облицовку откосов из гипсоволокнистых листов и окраску;
- дверей деревянных, металлических, ПВХ во внутренних проемах.

Внутренняя отделка стен и перегородок технических помещений (п. 10 табл.) объекта-аналога также укрупнена и включает: выравнивание, штукатурку и окраску; а для стен и перегородок лифтовых холлов, межквартирных коридоров, зон безопасности и лестничных клеток — выравнивание, декоративную штукатурку и окраску.

Внутренняя отделка жилых комнат, прихожих, коридоров, спален (штукатурка, окраска), кухонь, санузлов (облицовка плиткой), устройство плинтусов (п. 11 табл.) объекта-аналога укрупнено и включает: звукоизоляцию межкомнатных перегородок, устройство подшивных потолков, теплоизоляцию, оштукатуривание и окраску.

Штукатурка стен фасада и устройство навесного вентилируемого фасада стен первого этажа (п. 12 табл.) объекта-аналога укрупнена и включает устройство инвентарных лесов для наружной отделки фасада и отделку фиброцементными плитами на металлическом каркасе с утеплением навесного вентфасада, соответственно.

Отделка ограждений балконов и лоджий наружных (п. 13 табл.) объекта-аналога включает штукатурку и отделку декоративным мелкозернистым составом, а отделка внутренней части перегородок балконов — штукатурку и отделку декоративным мелкозернистым составом с окраской.

Внутренние системы инженерного обеспечения и оборудование (п. 14 табл.) объекта-аналога укрупнены и включают: системы водоснабжения и водоотведения, силовое электрооборудование и электроосвещение, сети связи, системы отопления, вентиляции, мусороудаления, индивидуальный тепловой пункт, вертикальный транспорт, автоматическую противопожарную защиту, мероприятия по обеспечению доступа инвалидов.

Устройство проездов под автомобильные дороги из асфальтобетона объекта-аналога объединено

с устройством отмостки из асфальтобетона (п. 15 табл.) и включает земляные работы.

В целях последующего учета действующей на момент расчета ставки налога на добавленную стоимость (20 %) при расчете показателя стоимости видов работ объекта-аналога, рассчитанного на единицу измерения (мощности), сумма налога НДС по ставке 18 % исключалась.

Для приведения расчетной планируемой (предполагаемой) стоимости работ на выполнение инженерных изысканий, проектирование и строительство объекта «Многоквартирный жилой дом, г. Севастополь» из уровня цен 2018 г. к текущему уровню цен 2020 г. используются следующие индексы-дефляторы Минэкономразвития России по видам экономической деятельности по строке «Инвестиции в основной капитал — «Строительство»: 2019 г. — 107,2 %, 2020 г. — 104,2 %.

Планируемая (предполагаемая) стоимость работ на выполнение инженерных изысканий, проектирование и строительство объекта «Многоквартирный жилой дом, г. Севастополь» к текущему уровню цен с учетом индексов-дефляторов Минэкономразвития России и НДС (по ставке 20 %) составит 999 715,81 тыс. руб.:

$$745\,817,91 \cdot 107,2\% \cdot 104,2\% \cdot 20\% = \\ = 999\,715,81 \text{ тыс. руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлен пример расчета предполагаемой (предельной) стоимости ИСП на выполнение инженерных изысканий, проектирование и строительство объекта «Многоквартирный жилой дом, г. Севастополь» с применением моделирования стоимости ИСП на основе показателей стоимости и видов работ объекта-аналога.

Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП, выполненный с применением показателей стоимости и видов работ объекта-аналога, осуществлен с учетом требований, предъявляемых к выбору объекта-аналога, приведен индексами-дефляторами Минэкономразвития России к текущему уровню цен, а также учитывает актуальную ставку по налогу на добавленную стоимость.

Значимость проведенного исследования состоит в практическом применении процесса моделирования стоимостных показателей объектов-аналогов, представленного на примере расчета и предназначенного для формирования документации по обоснованию инвестиций, оценке инвестиционной стоимости и принятию на его основе инвестиционных решений.

Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП на выполнение инженерных изысканий, проектирование и строительство объекта «Многоквартирный жилой дом, г. Севастополь» на примере объекта-аналога «Проектирование, строительство жилого дома. Республика Крым. Городской округ Ялта» с учетом устройства внутренних инженерных систем жизнеобеспечения

The analysis of projected (marginal) costs of an investment construction project in terms of civil engineering surveying, design and construction of the facility "An apartment house in Sevastopol" with regard for a similar project entitled "Design, construction of a residential house. Republic of Crimea. Yalta urban district", including the installation of utility network

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предполагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения (мощности) объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта-аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
1	2	3	4	5	6	7	8
Общестроительные работы и конструкции / General construction work and structures							
1	Земляные работы Excavation work	м³ / m³	5590,83	7379,90	Земляные работы (4300,65 м³) Excavation work (4,300.65 m³)	м³ / m³	1,32
Конструктивные решения, в том числе: / Structural solutions, including:							
2	Подземная часть. Устройство фундамента свайного, монолитного железобетонного ростверка, стен подвала, перекрытия над подвалом, лестницы спуска в подвал, площадки крыльца Subterranean structure. Construction of the piled foundation, monolithic reinforced concrete grillage, basement walls, basement ceiling, basement stairs, porch stair top	м³ / m³	4927,77	172 324,12	Подземная часть. Устройство фундамента свайного, монолитного железобетонного ростверка, стен подвала, перекрытия над подвалом, лестницы спуска в подвал, площадки крыльца Subterranean structure. Construction of the piled foundation, monolithic reinforced concrete grillage, basement walls, basement ceiling, basement stairs, porch stair top	м³ / m³	34,97
Надземная часть, в том числе: / Superstructure, including:							
3	Устройство монолитных железобетонных стен и перегородок, плит перекрытий, маршей и площадок, лифтовой шахты Construction of monolithic reinforced concrete walls and partitions, floor slabs, flights and landings, lift shafts	м³ / m³	7340,11	124 781,87	Устройство монолитных железобетонных стен и перегородок, плит перекрытий, маршей и площадок, лифтовой шахты Construction of monolithic reinforced concrete walls and partitions, floor slabs, flights and landings, lift shafts	м³ / m³	17,00

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предпо- лагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения (мощности) объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта- аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
4	Устройство наружных стен из пеноблоков, толщиной 200 мм Construction of external walls made of 200 mm foamed concrete blocks	м³ / m³	847,28	5312,45	Устройство наружных стен из пеноблоков, толщиной 200 мм Construction of external walls made of 200 mm foamed concrete blocks	м³ / m³	6,27
5	Устройство внутренних перегородок из газобетонных блоков и кирпича, толщиной до 200 мм Construction of internal partitions to be made of <200 mm gas-concrete blocks and bricks	м² / m²	9590,1	6904,87	Устройство внутренних перегородок из газобетонных блоков и кирпича, толщиной до 200 мм Construction of internal partitions to be made of <200 mm gas-concrete blocks and bricks	м² / m²	0,72
6	Устройство внутренних стен из кирпича толщиной до 200 мм Construction of interior walls to be made of <200 mm bricks	м³ / m³	231,22	5144,65	Устройство внутренних стен из кирпича толщиной до 200 мм Construction of interior walls to be made of <200 mm bricks	м³ / m³	22,25
7	Кровля (крыша) малоуклонная с организованным внутренним водостоком без чердака, с устройством выравнивающих стяжек, утеплением, пароизоляцией и гидроизоляцией Low-slope roof having an internal downpipe, no attic, having a levelling strainer, thermal insulation, a vapour seal and water proofing	м² / m²	1542,52	5136,59	Кровля (крыша) малоуклонная с организованным внутренним водостоком без чердака, с устройством выравнивающих стяжек, утеплением, пароизоляцией и гидроизоляцией Low-slope roof having an internal downpipe, no attic, having a levelling strainer, thermal insulation, a vapour seal and water proofing	м² / m²	3,33
8	Конструктивы заполнения проемов Structural solutions designated for openings	м² / m²	5501,23	56 772,69	Конструктивы заполнения проемов Structural solutions designated for openings	м² / m²	10,32
Внутренняя отделка, в том числе: / Interior finishing, including:							
9	Отделка стен и перегородок технических помещений, лифтовых холлов, межквартирных коридоров, зон безопасности, лестничных клеток The finishing of walls and partitions, engineering rooms, lift halls, lobbies, safety areas, staircases	м² / m²	9731,74	8855,88	Отделка стен и перегородок технических помещений, лифтовых холлов, межквартирных коридоров, зон безопасности, лестничных клеток The finishing of walls and partitions, engineering rooms, lift halls, lobbies, safety areas, staircases	м² / m²	0,91

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предполагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта-аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
10	Отделка жилых комнат, прихожих, коридоров, спален (штукатурка, окраска), кухонь, санузлов (облицовка плиткой), устройство плинтусов The finishing of habitable rooms, hallways, corridors, bedrooms (plastering, painting), kitchens, toilets (tiling), cove base installation	м² / m²	57 725,04	66 383,8	Отделка жилых комнат, прихожих, коридоров, спален (штукатурка, окраска), кухонь, санузлов (облицовка плиткой), устройство плинтусов The finishing of habitable rooms, hallways, corridors, bedrooms (plastering, painting), kitchens, toilets (tiling), cove base installation	м² / m²	1,15
Наружная отделка фасада: / The external finishing of the facade:							
11	Штукатурка стен фасада и устройство навесного вентилируемого фасада стен первого этажа The plastering of facade walls and construction of the ventilated façade attached to ground floor walls	м² / m²	4156,32	3532,87	Штукатурка стен фасада и устройство навесного вентилируемого фасада стен первого этажа The plastering of facade walls and construction of the ventilated façade attached to ground floor walls	м² / m²	0,85
12	Отделка ограждений балконов и лоджий наружных, внутренней части перегородок балконов The finishing of balcony/recessed balcony parapets and the internal part of balcony partitions	м² / m²	3052,33	2014,54	Отделка ограждений балконов и лоджий наружных, внутренней части перегородок балконов The finishing of balcony/recessed balcony parapets, the internal part of balcony partitions	м² / m²	0,66
13	Внутренние системы инженерного обеспечения и оборудование Internal engineering systems and equipment	Комплекс работ Work package	1	136 369,14	Внутренние системы инженерного обеспечения и оборудование Internal engineering systems and equipment	Комплекс работ Work package	104 899,34
Благоустройство территории / Area upgrade							
14	Устройство проездов под автомобильные дороги из асфальтобетона, устройство отмостки из асфальтобетона Construction of asphalt concrete driveways and perimeter paving	м² / m²	3766,1	10 620,4	Устройство проездов под автомобильные дороги из асфальтобетона, устройство отмостки из асфальтобетона Construction of asphalt concrete driveways and perimeter paving	м² / m²	2,82

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предполагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения (мощности) объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта-аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
15	Покрытие тротуаров из тротуарной плитки с устройством бортовых камней Paving slab and border stone installation	м² / m²	757,9	2008,44	Покрытие тротуаров из тротуарной плитки (площадью 583 м²) с устройством бортовых камней Paving slab (the total area of 583 m²) and border stone installation	м² / m²	2,65
16	Устройство площадок с установкой малых архитектурных форм Construction of playgrounds accommodating small architectural forms	м² / m²	912,6	1715,69	Устройство площадки, площадью 702 м², с установкой малых архитектурных форм Construction of the 702 m² playground accommodating small architectural forms	м² / m²	1,88
17	Озеленение территории Planting of greenery	м² / m²	2740,53	904,38	Озеленение территории, площадью 2108,1 м² Planting of greenery in the area that has the size of 2,108.1 m²	м² / m²	0,33
18	Организационно-технологические особенности строительства: обустройство технологических площадок из железобетонных плит для устойчивой работы бурового оборудования Construction process technology features: arrangement of construction sites covered with reinforced concrete slabs to ensure the stable operation of drilling machinery	м² / m²	101,14	1441,25	Организационно-технологические особенности строительства: обустройство технологических площадок из железобетонных плит для устойчивой работы бурового оборудования Construction process technology features: arrangement of construction sites covered with reinforced concrete slabs to ensure the stable operation of drilling machinery	м² / m²	14,25
	Итого стоимость работ: The total cost of work:			617 603,43			
Прочие работы и затраты / Other types of work and costs							
19	Временные здания и сооружения Temporary buildings and structures	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		5126,11	Временные здания и сооружения Temporary buildings and structures	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	0,83

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предпо- лагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения (мощности) объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта- аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
20	Пусконаладочные работы Pre-commissioning activities	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		679,36	Пусконаладочные работы Pre-commissioning activities	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	0,11
21	Утилизация строительных отходов Construction waste treatment	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		185,28	Утилизация строительных отходов Construction waste treatment	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	0,03
22	Затраты, связанные с командированием работников Business trip expenses	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		55 090,23	Затраты, связанные с командированием работников Business trip expenses	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	8,92
23	Строительный контроль Construction oversight	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		11 302,14	Строительный контроль Construction oversight	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	1,83
24	Инженерные изыскания Engineering surveying	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		25 074,70	Инженерные изыскания Engineering surveying	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	4,06

Окончание табл. / End of Table

Расчетные данные / Input data							
Расчет предполагаемой (предельной) стоимости ИСП Calculation of the projected (marginal) cost of an investment construction project				Стоимостные показатели видов работ объекта-аналога Breakdown of the cost of work performed at a similar project			
№ п.п. No.	Наименование работ Types of work	Единица измерения (мощности) (Capacity) measurement unit	Объем работ Amount of work	Расчетная предпо- лагаемая (предельная) стоимость, тыс. руб. (расчет = гр. 4 · гр. 9) Projected (marginal) cost, in thousand rubles (the cost = gr. 4 · gr. 9)	Наименование работ объекта-аналога Types of work performed at a similar facility	Единица измерения (мощности) объекта-аналога (Capacity) measurement unit of a similar facility	Показатель стоимости единицы измерения (мощности) объекта- аналога, тыс. руб. The cost parameter applicable to the measurement (capacity) unit at a similar facility, in thousand rubles
25	Проектные работы Design work	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		17 539,94	Проектные работы Design work	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	2,84
26	Экспертиза проектной документации Expert appraisal of design documentation	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		1111.69	Экспертиза проектной документации Expert appraisal of design documentation	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	0,18
27	Непредвиденные затраты Contingencies	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %		12 105,03	Непредвиденные затраты Contingencies	Доля затрат от стоимости объекта, % The share of costs in the facility value, %	1,96
Итого стоимость с учетом прочих работ и затрат, без учета НДС: Total costs inclusive of other types of work and costs, net of VAT				745 817,91			

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухарев О.С. Структурная политика: к новой инвестиционной модели экономического роста // *Финансы: теория и практика*. 2019. Т. 23. № 2. С. 84–104. DOI: 10.26794/2587-5671-2019-23-2-84-104
2. Климович М.А. Специфика структурных трансформаций в Российской экономике // *Вестник науки Сибири*. 2018. № 3 (30). С. 167–180.
3. Батищева Г.А., Батищева Е.А. Моделирование взаимосвязей инвестиций с показателями экономического роста в России // *Вестник Ростовского государственного экономического университета*. 2014. № 4 (48). С. 150–154.
4. Кузьминов А.Н., Медведская Т.К., Бадван Н.О. Инвестиционная политика государства: воспроизводственный аспект // *Финансовые исследования*. 2018. № 1 (58). С. 93–101.
5. Ухина А.В., Агафонова М.С., Половинкин И.С. Инвестиционно-инновационные факторы экономического роста // *Научное обозрение. Экономические науки*. 2016. № 2. С. 197–199.
6. Сагдатова Г.Я., Коцегулова И.Р. Модели экономического роста // *Молодой ученый*. 2017. № 15 (149). С. 456–459.
7. Опекунов В.А., Щербинин И.В. Исследование существующей системы разработки и реализации инвестиционно-строительных проектов // *Вестник университета*. 2018. № 9. С. 122–126. DOI: 10.26425/1816-4277-2018-9-122-126
8. Воробьев В.С., Синицина А.С. Состояние жилого фонда и причины деформаций зданий в городе Новосибирске // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2017. № 4–5 (56–57). С. 134–144.
9. Павлюченко Е.И., Асланова Р.Р. Анализ и совершенствование методики технико-экономического обоснования и оценки проектных решений в строительстве // *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2015. № 8 (58). С. 33–38.
10. Опекунов В.А., Щербинин И.В. Влияние подготовки исходно-разрешительной документации на сроки реализации инвестиционно-строительных проектов // *Вестник университета*. 2016. № 12. С. 59–64.
11. Васильева Н.В., Кудрявцева В.А. Анализ изменения стоимости строительства в ходе проведения экспертизы сметной документации // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Т. 8. № 4 (27). С. 25–34.
12. Опарин С.Г., Стасишина-Ольшевская А.Е. Управление риском потребности в дополнительном финансировании строительства объектов транспортной инфраструктуры // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2017. Т. 10. № 6. С. 132–141. DOI: 10.18721/JE.10612
13. Карманович А.В., Мозгов С.А. Обоснование инвестиций и предпроектная проработка инвестиционных проектов в металлургии на примере ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга “БМК”» // *Литье и металлургия*. 2020. № 2. С. 29–35. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-2-29-35
14. Казьмина А.И., Корой Е.И. Взаимосвязь предпроектных исследований и характера комплексной реконструкции жилых зданий // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2015. Т. 1. № 4. С. 32–39.
15. Кадыров Р.А., Мелехин В.Б. Методические аспекты экономического обоснования, оценки и выбора строительных проектов на альтернативной основе // *Вестник Евразийской науки*. 2018. Т. 10. № 1. С. 15.
16. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction // *52nd ASC Annual International Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723.
17. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management // *Civil Engineering Journal*. 2016. Vol. 2. Issue 6. P. 262. DOI: 10.28991/cej-030986
18. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Стоимостной инжиниринг как основа интеграции процессов планирования, финансирования и ценообразования в инвестиционно-строительной деятельности // *Вестник МГСУ*. 2015. № 11. С. 178–185. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.11.178-185
19. Сборщиков С.Б., Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А., Лейбман Д.М. Оценка эффективности управления реализацией строительного проекта в условиях воздействия случайных факторов // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 11 (110). С. 1240–1247. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1240-1247
20. Филлин С.А., Марушкина В.А. Особенности оценки эффективности инвестиционных девелоперских проектов // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2017. Т. 13. № 11 (356). С. 2112–2131. DOI: 10.24891/ni.13.11.2112
21. Shtefan M.A., Elizarova J.M. Investment project efficiency and risk evaluation: an integrated approach // *Business Informatics*. 2018. Vol. 2018. Issue 4. Pp. 54–65. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.54.65
22. Журавлев П.А. Организация ресурсно-технологического моделирования объектов капитального строительства в рамках инвестиционных программ // *Нормирование и оплата труда в строительстве*. 2019. № 7. С. 20–24.
23. Журавлев П.А. Ресурсно-технологическое моделирование, как инструмент, используемый при реализации федеральных и региональных инвестиционных программ // *Нормирование и оплата труда в строительстве*. 2017. № 8. С. 63–71.

Поступила в редакцию 21 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 15 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 15 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Павел Анатольевич Журавлев — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, организации и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 756279; tous2004@mail.ru;

Артур Марукович Марукян — кандидат технических наук, доцент, ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ»; 119415, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 53; РИНЦ ID: 1063001; A8874316@yandex.ru.

REFERENCES

1. Sukharev O.S. Structural policy: towards a new investment model of economic growth. *Finance: Theory and Practice*. 2019; 23(2):84-104. DOI: 10.26794/2587-5671-2019-23-2-84-104 (rus.).
2. Klimovich M.A. Specifics of structural transformations in the Russian economy. *Bulletin of Siberian Science*. 2018; 3(30):167-180. (rus.).
3. Batishcheva G.A., Batishcheva E.A. Modeling the relationship between investment and economic growth indicators in Russia. *Bulletin of Rostov State Economic University*. 2014; 4(48):150-154. (rus.).
4. Kuz'minov A.N., Medvedskaya T.K., Badvan N.O. State investment policy: reproductive aspect. *Financial Research*. 2018; 1(58):93-101. (rus.).
5. Uhina A.V., Agafonova M.S., Polovinkin I.S. Investment and innovation factors of economic growth. *Scientific Review. Economics*. 2016; 2:197-199. (rus.).
6. Sagdatova G.Y., Koshchegulova I.R. Economic growth model. *Young Scientist*. 2017; 15(149):456-459. (rus.).
7. Opekunov V.A., Shcherbinin I.V. Research of the existing system of development and implementation of investment-construction projects. *Vestnik Universiteta*. 2018; 9:122-126. DOI: 10.26425/1816-4277-2018-9-122-126 (rus.).
8. Vorob'ev V.S., Sinicina A.S. State housing and causes deformation of buildings in the city of Novosibirsk. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport*. 2017; 4-5(56-57):134-144. (rus.).
9. Pavlyuchenko E.I., Aslanova R.R. Analysis and improvement of the methodology of feasibility study and evaluation of design solutions in construction. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2015; 8(58):33-38. (rus.).
10. Opekunov V.A., Shcherbinin I.V. Impact of preparation of initial permits on the timing of implementation of investment and construction projects. *Vestnik Universiteta*. 2016; 12:59-64. (rus.).
11. Vasilyeva N.V., Kudryavtseva V.A. Analysis of changes in the cost of construction during the examination of estimate documentation. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018; 8:4(27):25-34. (rus.).
12. Oparin S.G., Stasishina-Olshevskaya A.E. Managing the risk of the need for additional financing of investment projects of transport infrastructure. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2017; 10(6):132-141. DOI: 10.18721/JE.10612 (rus.).
13. Karmanovich A.V., Mozgov S.A. Feasibility and design study of investment projects in metallurgy by the example of OJSC "BSW — management company of the holding «BMC»". *Foundry Production and Metallurgy*. 2020; 2:30-35. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-2-30-35 (rus.).
14. Kaz'mina A.I., Koroj E.I. The relationship predposlednij research and the nature of complex reconstruction of residential buildings. *Bulletin of science and education of the North-West of Russia*. 2015; 1(4):32-39. (rus.).
15. Kadyrov R.A., Melekhin V.B. Methodological aspects of economic justification, evaluation and selection of construction projects on an alternative basis. *Bulletin of Eurasian science*. 2018; 10(1):15. (rus.).
16. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction. *52nd ASC Annual International Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723
17. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management. *Civil Engineering Journal*. 2016; 2(6):262. DOI: 10.28991/cej-030986
18. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Cost engineering as the basis for integration of the processes of planning, financing and pricing in investment and construction activity. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 11:178-185. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.11.178-185 (rus.).
19. Sborshchikov S.B., Shinkareva G.N., Maslova L.A., Leybman D.M. Evaluation of effectiveness of managing construction project realization under the influence of random factors. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12:11(110):1240-1247. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1240-1247 (rus.).

20. Filin S.A., Marushkina V.A. Specifics of evaluating the efficiency of development investment projects. *Digest Finance*. 2018; 23(2):150-162. DOI: 10.24891/ni.13.11.2112 (rus.).

21. Shtefan M.A., Elizarova J.M. Investment project efficiency and risk evaluation: an integrated approach. *Business Informatics*. 2018; 2018(4):54-65. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.54.65

22. Zhuravlev P.A. Organization of material and process modeling of capital construction projects as part of investment programs. *Rationing and payment of labor in construction*. 2019; 7:20-24. (rus.).

23. Zhuravlev P.A. Resource-technological modeling as a tool used in the implementation of federal and regional investment programs. *Rationing and payment of labor in construction*. 2017; 8:63-71. (rus.).

Received August 21, 2020.

Adopted in revised form on December 15, 2020.

Approved for publication on December 15, 2020.

B I O N O T E S: **Pavel Zhuravlev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 756279; tous2004@mail.ru;

Artur M. Marukyan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **STROYGAZMONTAZH LLC**; 53 Vernadsky avenue, Moscow, 119415, Russian Federation; ID RISC: 1063001; A8874316@yandex.ru.

Жилищное строительство в современных условиях торможения экономического роста

М.Ю. Викторов

*Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации
(Минстрой России); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Вынужденное торможение темпов жилищного строительства, возникшее вследствие коронакризиса, не снимает задач, поставленных национальным проектом «Жилье и городская среда». Восстановительный рост жилищного строительства, как показывает практический анализ жилищной сферы, не может рассматриваться как следствие фрагментарно принимаемых мер. Новизна подхода заключается в выявлении наиболее проблемных препятствий развития и их комплексном преодолении в режиме цифровой трансформации проектов жилой застройки, способствующей поддержке платежеспособного спроса, оптимизации распределения рисков между участниками строительства и расширению использования превентивных механизмов внесудебного разрешения хозяйственных споров в строительстве.

Материалы и методы. Экспресс-анализ современного положения жилищной сферы, в том числе в региональном разрезе, позволил выявить наиболее важные факторы, препятствующие росту деловой активности в жилищной сфере. Методы системного анализа, локализованные во времени и пространстве, дали возможность использовать инструментальный ситуационный анализа в сегменте жилищного строительства.

Результаты. Многократное обсуждение причин сжатия объемов жилищного строительства на дискуссионных площадках Минстроя РФ, НОСТРОЯ, РАНХиГС, МГСУ и др. выявило, что полноценная реализация комплексных эффектов перехода к проектному финансированию невозможна без реализации принципа «симметрии рисков», мер поддержки платежеспособного спроса, предотвращения конфликтов интересов участников инвестиционно-строительной деятельности и практической реализации потенциала цифровой трансформации инвестиционно-строительных процессов в проектном формате на всех этапах жизненного цикла строительного проекта.

Выводы. Создание качественно новой цифровой среды в сфере жилищного строительства изменит не только плановые, контрольные и экспертные функции, но и оценочные, и коммуникационные механизмы, способствуя снижению транзакционных и операционных издержек, повышению оперативности и объективности строительного контроля, росту доверия и партнерской солидарности, сужению сферы судебных разбирательств и снижению количества банкротств и др., создавая базисные условия ускорения восстановительного роста жилищного строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: национальный проект, жилищное строительство, экономический рост, проблемы развития, строительный проект, цифровая трансформация, внесудебные методы разрешения споров

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Викторов М.Ю. Жилищное строительство в современных условиях торможения экономического роста // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1708–1716. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1708-1716

Housing construction in the present-day context of decelerating economic growth

Mikhail Yu. Viktorov

*Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (Ministry of Construction of Russia);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The unwanted slowdown of the housing construction process, triggered by the coronavirus crisis, does not cancel the tasks set by the national project "Housing and the Urban Environment". The practical analysis of the housing sector has confirmed that the economic recovery of the housing construction industry cannot be regarded as an outcome of inconsistent measures. The novelty of the approach lies in the identification of the most problematic development hurdles and their comprehensive overcoming in the context of digital transformation of residential development projects, which contributes to effective demand, optimizes the distribution of risk between construction work participants and expands the use of preventive mechanisms for the out-of-court settlement of commercial disputes arising in the construction sector.

Materials and methods. A quick analysis of the current situation in the housing sector, including the one in the regions, has identified the most important factors hindering the growth of business activities in this industry. Methods of systems analysis, adjusted in terms of time and space, made it possible to apply situational analysis tools to the housing construction sector.

Results. A repeated discussion of the reasons for the contraction of housing construction which is underway on discussion platforms of the Ministry of Construction of the Russian Federation, NOSTROY, RANEP, MGSU, etc. has revealed that the comprehensive implementation of aggregated effects that accompany the transition to project funding is impossible without the implementation of the principle of "risk symmetry", effective demand support, prevention of conflicts of interests between construction participants and the practical implementation of the potential of digital transformation of investment and construction processes in the project format at all stages of the life cycle of a construction project.

Conclusions. The nurture of a qualitatively new digital environment in the housing sector will change not only its planning, controlling and expert functions, but also the evaluation and communication mechanisms, as it contributes to reduction of transaction and operational costs, boosts the efficiency and objectivity of construction control, increases trust and partnership solidarity, narrows the scope of litigation and reduces the number of bankruptcies, etc., thus, setting the stage for an accelerated recovery and growth of the housing construction.

KEYWORDS: national project, housing construction, economic growth, development problems, construction project, digital transformation, out-of-court dispute resolution.

FOR CITATION: Viktorov M.Yu. Housing construction in the present-day context of decelerating economic growth. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1708-1716. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.12.1708-1716 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Вынужденная самоизоляция и принятие множества превентивных мер заражения граждан коронавирусом вызвали множество проблем не только в производственной, но и в потребительской сфере национальной экономики. Ситуация усугубляется также нестабильностью экспортного сектора, по-прежнему составляющего большую часть российской экономики; замедлением темпов мировой торговли; стагнацией реальных доходов и вынужденным в период кризиса, обусловленным коронавирусом, торможением экономического роста сферы услуг, что привело к убыточности ряда девелоперских проектов, в том числе в жилищной сфере.

Сложившееся положение в сфере жилищного строительства потребовало существенных корректировок условий ипотечного кредитования, организационно-экономической поддержки застройщиков и др. Экспресс-анализ мер поддержки показал, что их целесообразность, масштаб и порядок реализации требуют разработки системных мер развития строительства на основе возможностей, предоставляемых новой промышленной революцией, цифровой трансформацией и коммуникационной перезагрузкой. В целях детерминации указанных направлений проанализируем современное состояние жилищного строительства.

Ситуация на рынке жилья и до возникновения сложной эпидемиологической обстановки была далека от идеала фактически по всему кругу плановых показателей национального проекта «Жилье и городская среда» [1]. Неблагоприятная общеэкономическая ситуация была усугублена началом тотальной реформы жилищного строительства. В целях защиты интересов дольщиков государство приняло решительные меры борьбы с «недостроем». 1 июля 2019 г. завершился переход на использование эскроу-счетов, как основы, гарантирующей интересы дольщиков от механизмов проектного финансирования. Фактически произошла реструктуризация доходов и перераспределение рисков между участниками жилищного рынка. Это усилило роль ипотеки. Последняя стала «подушкой безопасности» в обеспечении ликвидности возведенного жилья. Проведенный анализ показал, что динамика и масштабы ипотечного кредитования последнего пяти-

летия являлись базовым фактором растущих темпов жилищного строительства. Не менее двух третей объемов сделок по приобретению жилья стали совершаться с использованием ипотеки.

Требования нацпроекта «Жилье и городская среда» [1, 2] в отношении объемов ввода жилой недвижимости актуализировали целый блок мер поддержки ипотеки. Но, несмотря на их высокий стимулирующий эффект, уже в 2019 г. было очевидно, что спрос на ипотеку падает, как в силу определенного удовлетворения потребностей на рынке жилья, так и вследствие снижения реальных доходов населения, начавшегося фактически с 2012 г. Стало очевидно, что нуждающимся в улучшении жилищных условий гражданам с заработной платой менее 50 тыс. руб. ипотека недоступна. Альтернативных вариантов приобретения жилья российская практика не выработала и, как следствие, уже с 2019 г. стал наблюдаться резкий спад ввода жилья практически во всех регионах за исключением г. Москвы [3, 4]. К примеру, по данным НОСТРОЯ в Республике Алтай объемы ввода жилья упали на 50 %, а в Томской области на 37 %. Возникает вопрос: меры защиты дольщиков действительно обеспечили их интересы или обеспечили доминирующее положение банков, обезопасив их деятельность за счет нарушения интересов других участников рынка недвижимости? Паритет интересов был не только нарушен реформой, но и привел, в частности, к тому, что множество не самых крупных застройщиков в малых и средних городах России приостановили свою деятельность, и только порядка двух десятков крупнейших застройщиков в крупных городах, успешно воспользовавшись проектным финансированием, продолжили деятельность и фактически монополизировали рынки жилья в крупных городах.

На конец 2019 г. проведенный НОСТРОЕМ РФ анализ [5] показал, что в малых городах России с численностью населения от 50 до 100 тыс. человек работает в настоящее время всего 241 застройщик, причем в 42 регионах с малыми городами новое строительство не ведется! Исследование причин продемонстрировало, что за проектным финансированием обратились более 60 % застройщиков, 75 % из них получили отказ как вследствие недостатка собственных средств, так и в результате недостаточной высокой прибыльности проекта. 8 % застройщи-

ков, ведущих деятельность в малых городах, отказались от кредита по причине высоких процентных ставок. Кроме того, сроки предоставления кредита колеблются по факту от 45 дней до 6 месяцев, что, в принципе, может лишить проект преимуществ конкурентного типа [6–8].

Будучи самым защищенным от рисков видом бизнеса, банки современной России давно перестали быть партнерами и поддержкой хозяйствующих субъектов, а их услуги «обросли» дополнительными комиссионными поборами:

- платой за резервирование (0,1 % от кредитного лимита);
- платой за открытие аккредитива (3 % годовых от невыбранного остатка аккредитива);
- платой за поддержание лимита (1 % одновременно от суммы лимита до выдачи первого транша);
- платой за банковское сопровождение (1 % от суммы каждого платежа застройщика);
- платой за инжиниринг (1 % от стоимости строительства) и др.

В результате банковские услуги могут увеличиваться до 12 % годовых, что существенно выше декларированных ими ранее практически на всех дискуссионных площадках 5 % годовых [9–11].

Период коронакризиса обострил в том числе хронические проблемы строительства [12, 13]. По данным «Мониторинга незавершенного строительства в РФ», проводимого Счетной палатой РФ, более чем 30 % объектов незавершенного строительства, строящихся за счет федерального бюджета и региональных бюджетов, начиная с 2018 г. приостановлены или законсервированы, а в 2020 г. может быть приостановлено до 43 % начатых строек в различной степени готовности [14]. Минстрой РФ оценивает проблему потенциального недоостроя в 2020 г. более чем в 2,2 трлн руб. или около 700 тыс. квартир. Их структурный анализ показал, что 50 % от общего количества квартир, сдаваемых с нарушением сроков сдачи, приходится на девять субъектов Федерации. Среди них лидируют Москва, Краснодарский и Забайкальский край, Московская область, Республика Крым и др. Только в Москве риск не получить квартиры распространяется на более чем 40 тыс. семей. Особенно сложно обстоят дела в столице и Краснодарском крае. Там, с использованием договоров долевого участия до 60 % квартир попадают, по мнению экспертов, в зоны высокого риска [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Меры, предложенные Правительством РФ в области строительства, касаются в первую очередь поддержки ликвидности строительной продукции. В частности, предусмотрено субсидирование ипотеки по ставке 6,5 %, а на завершение проблемных объектов в апреле текущего года было выделено по-

рядка 30 млрд руб. [16]. Процедуры включения объектов не были прозрачными для общественности, также как их финальный перечень, что не позволяет оценить эффективность их исполнения. Но в любом случае, по мнению экспертного сообщества, экономическая активность в строительном комплексе может упасть в зависимости от региональной локализации на 5–35 %, при том, что она и так находится на историческом минимуме. Это свидетельствует о необходимости расширения пакета поддержки мер жилищного сегмента строительного рынка. Их состав, масштаб и порядок реализации, по мнению автора, должен учитывать ряд факторов.

В первую очередь, *платежеспособный спрос*. Заметим, что его определяют две прямо противоположные тенденции: падающие реальные доходы, объективно понижающие объем ипотеки, и существенная коррекция структуры накопления граждан. Уточним, что ожидать ипотечного бума, как следствия мер субсидирования ставки ипотечного кредитования, не стоит. Но активизация спроса от 3 до 5 % от объема договора долевого участия (ДДУ) прогнозируется. Вторая тенденция реструктуризации накоплений имеет гораздо большие перспективы. Они обусловлены намерениями переадресации средств населения с депозитных счетов в недвижимость. Налоговая коррекция, связанная с дополнительным обложением доходов, получаемых по депозитным процентам, нестабильность курса национальной валюты, отсутствие навыка работы с инвестиционными инструментами и др. побуждает россиян, имеющих свободные средства, вложить их в жилую недвижимость, в том числе с целью последующего коммерческого использования. Активизация этого сегмента спроса напрямую зависит от мер удержания роста цен на жилую недвижимость и использования гибкой системы механизмов приобретения жилой недвижимости.

Важнейшее значение в современных условиях приобретает *оценка финансовых рисков* основных участников проектов жилищного строительства. А это: граждане, застройщики и банки. По оценкам Института экономики города (апрель 2020 г.), суммарный объем потенциальных потерь на рынке жилья в период коронакризиса составит 2,2 трлн руб., а это более 2 % ВВП страны. Анализ показал, что потенциальные потери распределяются между участниками далеко непропорционально. Большая доля приходится на застройщиков — более 1,3 трлн руб., т.е. 59 % от общего объема. 897 млрд руб. (41 %) вложили граждане. При этом за счет ипотечного кредитования под залог ДДУ — 377 млрд руб. И только 100 млрд руб. (4,5 %) было представлено банками в форме проектного финансирования застройщикам, реализующим проекты по новой схеме с использованием эскроу-счетов [17, 18]. Очевидно, что о реализации принципа «симметрии рисков» в такой ситуации говорить не приходится, что лиш-

ний раз позволяет предположить, что реформа создала совершенно излишнюю зону хозяйственного комфорта деятельности только одного из ключевых участников инвестиционно-строительной деятельности. Более того, традиция перекладывать риски на государственный бюджет также должна последовательно уступать место соразмерному сбалансированно по доходам и рискам партнерству всех участников строительства.

Третьим, критически важным фактором преодоления последствий коронакризиса является *существенное расширение использования внесудебных методов разрешения хозяйственных споров* в сфере долевого строительства. Накопленные годами судебных тяжб проблемы партнерского взаимодействия, как показывает опыт, не справлялись с ситуацией и до коронакризиса. Почти 2 млн судебных дел в сфере строительства в 2019 г. привели к усилению напряженности партнерского взаимодействия, пагубно сказались на деятельности добросовестных участников жилищного строительства, привели к прямым убыткам и массовым банкротствам [19, 20]. В силу сказанного, внесудебные механизмы преодоления противоречий экономических интересов участников жилищного строительства и, в целом, всей градостроительной сферы стали предметом обсуждения Госсовета РФ (июнь 2020 г.). В эпицентре решения проблемы — разработка механизмов медиации в градостроительстве. Именно такие механизмы позволят максимально быстро приблизиться к консенсусу экономических интересов участников строительства, достроить объекты, урегулировать разногласия.

Четвертым, как показывает анализ потенциала эффективности цифровизации проектов жилищного строительства, осуществляемых в стране и за рубежом, становится системная цифровая трансформация инвестиционно-строительной деятельности [21–23].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Новая методическая основа управления строительными проектами объединена семейством гибких итеративно-инкрементальных методов управления проектом и продуктом, объединенных понятием Agile [24]. Она позволяет в системном виде оперировать набором идей и принципов реализации проектов, соблюдая целевые установки по всем составляющим (подпроектам) отдельно. В этом случае на практике удастся формализовать, оцифровывать и обеспечивать в оперативном режиме передачу результатов подпроектов в ускоренном режиме. Приступая к новому этапу реализации проекта, именно в него могут быть внесены изменения без больших затрат и влияния на остальные проекции строительного проекта.

Основываясь на Agile, целесообразно формировать новые гибкие методы — фреймворки (к примеру, Scrum, Kanban и др.). В условиях цифровизации последние обеспечивают:

- 1) гибкость и адаптивность отдельных частей и строительного проекта в целом;
- 2) скоростную реакцию на изменения, реализуя базовые постулаты методологии управления организационно-экономическими изменениями;
- 3) согласованность командного взаимодействия;
- 4) сжатие сроков реализации проектов;
- 5) эффективную реакцию и функционирование в условиях нарастающей неопределенности.

Структурированные методы управления проектами, применяемые в различных отраслях [25–31] по всем основным процессам инвестиционно-строительной деятельности в цифровом формате, направлены на обеспечение всеобъемлющего контроля от начала до конца проекта, учет особенностей объекта управления, регламентацию процесса прохождения границ этапов проекта, экономически обоснованное принятие решений и максимизацию различных видов проектного эффекта.

Анализ различных подходов к управлению проектами (Agile, процессный, ценностный, компетентный и гейтовый) показал, что практическая реализация абсолютно всех подходов требует цифровизации, а внедрение ее основных инструментов, таких как PropTech и ConTech, становится в современных условиях необходимостью. Так, PropTech, будучи новым комплексным подходом к приобретению, эксплуатации и управлению недвижимостью, аккумулирует новые бизнес-модели рынка недвижимости, позволяющие:

- 1) обеспечивать сквозное взаимодействие на всех этапах жизненного цикла здания;
- 2) систематизировать клиентский опыт эксплуатации;
- 3) развивать услуги space-as-a-service (гибкие арендные сроки, опыт использования и дополнительные услуги по аренде);
- 4) осуществлять смартизацию и оптимизацию эксплуатационных режимов;
- 5) обеспечивать развитие экосистемы связанных зданий и др.

Результаты анализа инструментов PropTech в России представлены в табл.

Соответственно, технологии ConTech нацелены на смартизацию городов и зданий, а также строительную индустрию. Финансовые потоки технологически объединяет группа технологий FinTech.

Факторный анализ показал наличие огромных возможностей использования новейших технических достижений, организационных и экономических моделей, механизмов бесконфликтного коммуникационного типа [32–36].

Внедрение инструментов PropTech в России

Implementation of PropTech tools in Russia

Использование различных технологий Use of varied technologies	Уже используется Already in use	Запланировано Planned for use	Не планируется Not planned for use
1	2	3	4
<i>Управление на основе данных / Data-driven management</i>			
Внедрение промышленной системы управления клиентским опытом и данными о клиентах Introduction of an industrial-scale client experience and client data management system	53 %	28 %	20 %
Внедрение специализированной системы управления недвижимостью (REM — Real Estate Management) Introduction of a specialized REM (real estate management) system	20 %	28 %	53 %
Внедрение специализированной системы управления информацией об объектах строительства (BIM — Building Information Management) Introduction of a specialized BIM (building information management) system	30 %	25 %	45 %
Управление и принятие решений на основе анализа больших данных и технологий машинного обучения, искусственного интеллекта Management and decision-making on the basis of big data analysis and machine learning technologies, artificial intelligence	15 %	37 %	49 %
Использование геоинформационных систем с интеграцией GPS/ГЛОНАСС Use of geographic information systems integrated with GPS/GLONASS	18 %	20 %	63 %
Внедрение цифрового маркетинга Introduction of digital marketing	32 %	32 %	37 %
<i>Автоматизация и роботизация бизнес-процессов / Automation and robotization of business processes</i>			
Автоматизация учета рабочего времени и ТМЦ Automation of work time logging and inventory	32 %	22 %	46 %
Подготовка исполнительной документации в ходе строительства Drafting executive documentation in the process of construction	30 %	27 %	43 %
Автоматизация системы управления инженерными данными (например, расчетов начислений ЖКХ) Automation of an engineering data management system (for example, a utility billing management system)	29 %	34 %	37 %
<i>ПО и мобильные приложения / Software and mobile applications</i>			
Мобильные приложения для покупателей/арендаторов Mobile applications for purchasers/lessors	41 %	28 %	31 %
Мобильные приложения для оптимизации работы с действующими партнерами (брокеры) Mobile applications for optimized interaction with continuing partners (brokers)	26 %	23 %	51 %
<i>Технологии AR/VR / AR/VR technologies</i>			
Обучение сотрудников Personnel training	11 %	19 %	69 %
Визуализация проектной документации Project documentation visualization	13 %	26 %	62 %

Окончание табл. / End of Table

Использование различных технологий Use of varied technologies	Уже используется Already in use	Запланировано Planned for use	Не планируется Not planned for use
1	2	3	4
Виртуальные туры при продажах Sale supporting virtual tours	20 %	24 %	56 %
<i>IoT и дроны / IoT and drones</i>			
Использование технологии IoT для реализации концепции «умный объект» Using the IoT technology to implement the “smart facility” concept	8 %	25 %	67 %
Мониторинг строительных площадок Construction site monitoring	39 %	22 %	39 %
Маркетинг: съемки с воздуха как инструмент продаж Marketing: aerial cinematography as a sales instrument	38 %	22 %	41 %
Топографическая съемка Land surveying	42 %	17 %	42 %
<i>Прочие технологии / Other technologies</i>			
Использование смарт-контрактов и технологии блокчейн Using smart contracts and the blockchain technology	0 %	27 %	73 %

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, вовлечение накоплений граждан в жилую недвижимость как эффективная форма сбережений при условии обеспечения предсказуемости ценовой динамики и обеспечения экономической безопасности механизмов ДДУ, активизация мер достижения «симметрии рисков» участников жи-

лищного строительства, ускорение практической реализации механизмов внесудебного разрешения хозяйственных споров, реализуемых в формате новых информационно-коммуникационных механизмов и цифровой трансформации строительства, по мнению авторов, станут решающими факторами преодоления последствий коронакризиса в строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яськова Н.Ю. О цене авральных реформ (на примере реформы долевого строительства жилой недвижимости) // Недвижимость: экономика, управление. 2019. № 4. С. 13–17.
2. Одинцова А.В. Национальный проект «Жилье и городская среда» в системе пространственного развития России // Федерализм. 2019. № 4 (96). С. 41–58. DOI: 10.21686/2073-1051-2019-4-41-58
3. Ефимов К.В., Беляков С.И. Анализ отечественного и зарубежного опыта реализации программ реформирования и развития отрасли жилищного строительства // Экономика и предпринимательство. 2020. № 6 (119). С. 78–81. DOI: 10.34925/EIP.2020.119.6.012
4. Галушко М.В., Акулова А.Ш., Рахматуллин Р.Р. Проблемы и перспективы развития строительной отрасли РФ в нестабильных экономических и геополитических условиях // Финансовая экономика. 2018. № 6. С. 809–812.
5. Грабовый П.Г., Околелова Э.Ю., Трухина Н.И. Динамическая модель прогнозирования развития инновационного проекта // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1 (367). С. 78–82.
6. Lukmanova I., Sizova E., Zhutaeva E., Mironova O. Justification of the methodological approach to formation of the parties of innovation activities in holdings // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. P. 04014. DOI: 10.1051/mateconf/201823904014
7. Яськова Н.Ю. Проектное дело — от лозунгов к внедрению // Креативная экономика. 2017. Т. 11. № 11. С. 1219–1230.
8. Яськова Н.Ю. Современные контексты проектного подхода в сфере недвижимости // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 3. С. 35–38.
9. Викторов М.Ю., Казанский Н.В. О новых задачах государственного управления процессами, связанными с решением жилищной проблемы //

Государственная служба. 2019. Т. 21. № 6 (122). С. 72–77. DOI: 10.22394/2070-8378-2019-21-6-72-77

10. Ковалев С.В., Силка Д.Н. Систематизация проблем и решений в сфере обслуживания фондов капитального строительства // Экономика и предпринимательство. 2017. № 3–1 (80). С. 890–893.

11. Ларионов А.Н. Организационно-экономические проблемы перехода от метода долевого строительства жилья к проектному финансированию // Градостроительство. 2018. № 1 (53). С. 16–21.

12. Соловьев В.В., Корчагин А.П. Актуальные вопросы совершенствования системы ценообразования в строительстве в переходном периоде // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 4. С. 605–616. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.605-616

13. Gusev S., Makarov E., Vasiliev D., Marosin V. Smart management and power consumption forecasting in passenger transport // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Pp. 92–106. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_9

14. Kovalenko K.E., Bakhvalov S.Y., Zekiy A.O., Vikulina V.V., Tinkov S.A., Tkacheva T.V. Key indicators of innovation activity of Russia (from 2011 to 2017) // Journal of Entrepreneurship Education. 2019. Vol. 22. Issue. 3. Pp. 1–7. URL: <https://www.abacademies.org/articles/key-indicators-of-innovation-activity-of-russia-from-2011-to-2017-8230.html>

15. Tinkov S., Babenko I., Tinkova E. Digital transformation of production systems within the concept “Industry 4.0” // Vision 2025: education excellence and management of innovations through sustainable economic competitive advantage : proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA). 2019. Pp. 7310–7318.

16. Abdelrazik A.S., Al-Sulaiman F.A., Saidur R. Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 205. P. 112449. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112449.

17. Горохова А.С. Проектное финансирование в России и за рубежом. Риски, преимущества и недостатки // Nauka-rastudent.ru. 2014. № 5 (05). С. 3.

18. Ларионов А.Н. К вопросу о преждевременности отказа от долевого строительства и перевода жилищного строительства на проектное финансирование // Строительство. Экономика и управление. 2018. № 3 (31). С. 4–11.

19. Зайцева Л.И. Условия и предпосылки внедрения внесудебных способов разрешения споров в инвестиционно-строительной сфере // Государственная служба. 2019. № 4. С. 66–69.

20. Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I. Application of alternative dispute resolution in the field of construction projects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 012182. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012182

21. Кравченко И.И. Цифровизация в строительной отрасли // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2020. № 2 (77). С. 66–73.

22. Уварова С.С., Паненков А.А., Сонин Я.Л. Цифровизация строительства в проекции теории организационно-экономических изменений // Экономика строительства. 2020. № 1 (61). С. 31–39.

23. Сыроваткина Т.Н. Цифровизация воспроизводственной инфраструктуры экономики строительства // Фундаментальные исследования. 2020. № 4. С. 104–108. DOI: 10.17513/fr.42732

24. Afanasyeva A., Fedorova S., Yulbarisova G. Availability of innovative housing from the perspective of sustainable construction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 012182. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012182

25. Yang-Yu L., Slotine J., Barabási A. Controllability of complex networks // Nature. 2011. Vol. 473. Issue 7346. Pp. 167–173. DOI: 10.1038/nature10011

26. Соломонова Е.А. Методы управления инвестиционными проектами // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 62–11. С. 26–30. DOI: 10.18411/lj-06-2020-233

27. Лукманова И.Г., Яськова Н.Ю. О новых задачах инвестиционно-строительной деятельности в контексте трендов пространственного развития России // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 6 (129). С. 774–784. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.774-784

28. Силка Д.Н. Совершенствование институциональной среды инвестиционно-строительной деятельности // Региональная экономика: теория и практика. 2010. № 7. С. 17–21.

29. Peshkov V. The building complex of the region in the aspect of implementing the main directions of the strategy for the development of the housing sector // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 212. P. 04010. DOI: 10.1051/mateconf/201821204010

30. Набиев Р.А., Зверев В.В., Иглина Н.А. Методические подходы к управлению проектами развития территории на основе комплексной жилой застройки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2020. № 1. С. 61–67. DOI: 10.24143/2073-5537-2020-1-61-67

31. Бурганова Т.А. Управление проектами: методология и современные тренды // Электронный экономический вестник Татарстана. 2018. № 4. С. 60–67.

32. Yuan J., Farnham C., Emura K. Development and application of a simple BEMS to measure energy consumption of buildings // Energy and Buildings. 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.012

33. Lanzafame R., Messina M., Mauro S. HAWT design and performance evaluation: Improving the BEM theory mathematical models // Energy Procedia. 2015. Vol. 82. Pp. 172–179. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.015

34. Volkov A., Chelyshkov P., Lysenko D. Information management in the application of BIM in construction. stages of construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 833–837. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.251

35. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моде-

лировании зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 1. С. 65–72.

36. Чурбанов А.Е., Шамара Ю.А. Влияние технологии информационного моделирования на развитие инвестиционно-строительного процесса // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 824–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835

Поступила в редакцию 14 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2020 г.

Одобрена для публикации 21 декабря 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Юрьевич Викторов** — доктор экономических наук, руководитель Комиссии по вопросам реализации внедрения технологии информационного моделирования на всех этапах «жизненного цикла» объектов капитального строительства Общественного совета при Минстрое РФ; **Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России)**; 127994, г. Москва, ул. Садовая-Самотечная, д. 10, стр. 1; РИНЦ ID: 288130; mcua@yandex.ru.

REFERENCES

1. Yaskova N.Yu. About the price of rush reforms (on the example of shared construction). *Real Estate: Economics, Management*. 2019; 4:13-17. (rus.).
2. Odintsova A.V. National project “Housing and urban environment” in the system of spatial development of Russia. *Federalism*. 2019; 4(96):41-58. DOI: 10.21686/2073-1051-2019-4-41-58 (rus.).
3. Efimov K.V., Belyakov S.I. Analysis of domestic and foreign experience in implementing programs for reforming and developing the housing construction industry. *Economics and Entrepreneurship*. 2020; 6(119):78-81. DOI: 10.34925/EIP.2020.119.6.012 (rus.).
4. Galushko M.V., Akulova A.Sh., Rakhmatullin R.R. Problems and prospects for the development of the construction industry in the Russian Federation in unstable economic and geopolitical conditions. *Financial Economics*. 2018; 6:809-812. (rus.).
5. Grabovyy P.G., Okolelova E.Yu., Trukhina N.I. Dynamic model of forecasting of development of the innovative project. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2017; 1(367):78-82. (rus.).
6. Lukmanova I., Sizova E., Zhutaeva E., Mironova O. Justification of the methodological approach to formation of the parties of innovation activities in holdings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 239:04014. DOI: 10.1051/mateconf/201823904014
7. Yaskova N.Yu. Design business — from slogans to implementation. *Creative Economy*. 2017; 11(11):1219-1230. (rus.).
8. Yaskova N.Yu. Modern contexts of real estate field project approach. *Real Estate: Economics, Management*. 2017; 3:35-38. (rus.).
9. Viktorov M.Yu., Kazansky N.V. On new tasks of state management of processes related to the solution of the housing problem. *State Service*. 2019; 21:6(122):72-77. DOI: 10.22394/2070-8378-2019-21-6-72-77 (rus.).
10. Kovalev S.V., Silka D.N. Systematization of problems and solutions in the sphere of servicing of capital construction funds. *Economy and Entrepreneurship*. 2017; 3-1(80):890-893. (rus.).
11. Larionov A.N. Organizational and economic problems of transition from the method of sharing construction to housing to project financing. *Urban Planning*. 2018; 1(53):16-21. (rus.).
12. Solov'ev V., Korchagin A. Current issues of improving the pricing system in construction in the transition period. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 15(4):605-616. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.605-616 (rus.).
13. Gusev S., Makarov E., Vasiliev D., Marosin V. *Smart Management and Power Consumption Forecasting in Passenger Transport*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019; 92-106. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_9
14. Kovalenko K.E., Bakhvalov S.Y., Zekiy A.O., Vikulina V.V., Tinkov S.A., Tkacheva T.V. Key indicators of innovation activity of Russia (from 2011 to 2017). *Journal of Entrepreneurship Education*. 2019; 22(3):1-7. URL: <https://www.abacademies.org/articles/key-indicators-of-innovation-activity-of-russia-from-2011-to-2017-8230.html>
15. Tinkov S., Babenko I., Tinkova E. Digital transformation of production systems within the concept “Industry 4.0”. *Vision 2025: education excellence and management of innovations through sustainable economic competitive advantage. Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA)*. 2019; 7310-7318.

16. Abdelrazik A.S., Al-Sulaiman F.A., Saidur R. Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems. *Energy Conversion and Management*. 2020; 205:112449. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112449
17. Gorokhova A.S. Project financing in Russia and abroad. Risks, advantages and disadvantages. *Nauka-rastudent.ru*. 2014; 5(05):3. (rus.).
18. Larionov A.N. To the question of prematurity of refusal of share construction. *Construction. Economy and Control*. 2018; 3(31):4-11. (rus.).
19. Zaitseva L.I. Conditions and background for the introduction of non-judicial dispute resolution methods in the investment and construction sphere. *Gosudarstvennaya Sluzhba*. 2019; 4:66-69.
20. Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I. Application of alternative dispute resolution in the field of construction projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90:012182. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012182
21. Kravchenko I.I. Digitalization in the construction industry. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2020; 2(77):66-73. (rus.).
22. Uvarova S.S., Panenkov A.A., Sonin Ya.L. Digitalization of construction in the projection of the theory of organizational and economic changes. *Economy of Construction*. 2020; 1(61):31-39. (rus.).
23. Syrovatkin T.N. Digitalization of the reproductive infrastructure of the construction economy. *Basic Research*. 2020; 4:104-108. DOI: 10.17513/fr.42732 (rus.).
24. Afanasyeva A., Fedorova S., Yulbarisova G. Availability of innovative housing from the perspective of sustainable construction. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012182. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012182
25. Yang-Yu L., Slotine J., Barabási A. Controllability of complex networks. *Nature*. 2011; 473(7346):167-173. DOI: 10.1038/nature10011
26. Solomonova E.A. Methods for managing investment projects. *Trends in the Development of Science and Education*. 2020; 62-11:26-30. DOI: 10.18411/lj-06-2020-233 (rus.).
27. Lukmanova I.G., Yaskova N.Yu. On investment and construction activity tasks in the context of Russian spatial development trends. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(6):774-784. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.774-784 (rus.).
28. Silka D.N. Improving the institutional environment for investment construction activities. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2010; 7:17-21. (rus.).
29. Peshkov V. The building complex of the region in the aspect of implementing the main directions of the strategy for the development of the housing sector. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 212:04010. DOI: 10.1051/mateconf/201821204010
30. Nabiev R.A., Zverev V.V., Iglina N.A. Methodological approaches to the management of projects for the development of a territory on the basis of an integrated residential development. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2020; 1:61-67. DOI: 10.24143/2073-5537-2020-1-61-67 (rus.).
31. Burganova T.A. Project management: methodology and modern trends. *Electronic Economic Bulletin of Tatarstan*. 2018; 4:60-67. (rus.).
32. Yuan J., Farnham C., Emura K. Development and application of a simple BEMS to measure energy consumption of buildings. *Energy and Buildings*. 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.012
33. Lanzafame R., Messina M., Mauro S. HAWT Design and performance evaluation: improving the BEM theory mathematical models. *Energy Procedia*. 2015; 82:172-179. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.015
34. Volkov A., Chelyshkov P., Lysenko D. Information management in the application of BIM in construction. stages of construction. *Procedia Engineering*. 2016; 153:833-837. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.251
35. Belyaev A.V., Antipov S.S. Life cycle of construction objects at information simulation of buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 1:65-72. (rus.).
36. Churbanov A.E., Shamara Yu.A. The impact of information modeling technology on the development of investment construction process. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13:7(118):824-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835 (rus.).

Received November 14, 2020.

Adopted in revised form on December 18, 2020.

Approved for publication on December 21, 2020.

B I O N O T E S : **Mikhail Yu. Viktorov** — Doctor of Economic Sciences, Head of the Commission for the implementation of information modeling technology at all stages of the “life cycle” of capital construction objects of the Public Council under the Ministry of Construction of the Russian Federation; Ministry of Construction, **Housing and Utilities of the Russian Federation (Ministry of Construction of Russia)**; build. 1, 10 Sadovaya-Samotechnaya st., Moscow, 127994, Russian Federation; ID RISC: 288130; mcua@yandex.ru.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Рецензия на учебное пособие «Фасадные строительные материалы» (2020 год)

А.Д. Жуков, В.С. Семенов, С.Ю. Шеховцова, Б.А. Ефимов

The review of the “Building facade materials” (2020) study guide

A.D. Zhukov, V.S. Semenov, S.Yu. Shekhovtsova, B.A. Efimov

Формирование городской среды во многом определяется как общими градостроительными параметрами, так и архитектурными решениями зданий, немаловажную роль в которых выполняют фасадные системы. Основные задачи строительного комплекса — продвижение передовых энергоэффективных технологий, создающих минимальную нагрузку на окружающую среду. Это может быть решено, в том числе, и внедрением инновационных фасадных систем.

Важным также является повышение архитектурной выразительности фасадов, которая во многом зависит от их финишной отделки: сайдингом, деревянной вагонкой, каменными плитами, облицовки кирпичом, композитными плитами; штукатурки или покраски, светопрозрачным оформлением.

В разделах учебного пособия рассматриваются вопросы архитектурного оформления фасадов и во-

просы их конструирования, в том числе с применением энергоэффективных систем — вентилируемых фасадов, фасадных композиционных теплоизоляционных систем, основанных на слоистой кладке с утеплением, и каркасных систем с утеплением.

Учебное пособие адресовано студентам средних специальных и высших учебных заведений, обучающихся по программе бакалавриата по направлению «Строительство» и «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Пособие опубликовано в электронном виде и доступно для пользователей. Оно выполнено на хорошем методическом уровне, имеет практическую значимость, что позволяет рекомендовать авторов учебного пособия (кандидатов технических наук, доцентов А.Д. Жукова, В.С. Семенова, С.Ю. Шеховцову, Б.А. Ефимова) к выдвижению для участия в Конкурсе на медали и дипломы РААСН.

Владимир Александрович Перфилов,

доктор технических наук, профессор,
советник РААСН, заведующий кафедрой нефтегазовых сооружений,
Волгоградский государственный технический 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.

	Форма № ПД-4									
Извещение Кассир	УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 40%; text-align: right;">Вестник МГСУ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(наименование платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Сумма платы за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)		Вестник МГСУ	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)	
	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9								
	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)								
		Вестник МГСУ								
	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)								
	Квитанция Кассир	Форма № ПД-4 УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 (наименование получателя платежа) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 50%; text-align: center;">4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(ИНН получателя платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер счета получателя платежа)</td> </tr> </table> в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <u>0 4 4 5 2 5 0 0 0</u> (наименование банка получателя платежа) КБК <u>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0</u> ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u> Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г. <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 40%; text-align: right;">Вестник МГСУ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(наименование платежа)</td> <td style="text-align: center;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> </table> Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____ Сумма платы за Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9	(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)		Вестник МГСУ	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)
		7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9							
		(ИНН получателя платежа)	(номер счета получателя платежа)							
			Вестник МГСУ							
		(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)							

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



