

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 5
2025**

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

Сквозной номер 198

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 5
2025**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.05.2025.
Подписан в свет	30.05.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,76. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 157

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.05.2025

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2025

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova* **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

Н.А. Сенькин, В.С. Васильев

Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи 637

С.А. Соловьев, О.Е. Копейкин, А.А. Соловьева

Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности 655

А.В. Алексейцев, К.В. Юрусов

Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки 667

Н.Т. Ву, Е.Н. Полякова

Деформирование бетона при объемном напряженном состоянии 683

А.Р. Туснин, Е.К. Грачева

Обобщенные параметры композитных мембранных конструкций 694

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.В. Миронов, Е.А. Ерофеев, Ю.А. Иванюшин, А.А. Кадысева

Расчет вакуумного анкера на выдергивающее усилие в установках использования энергии морских волн 709

А.Г. Алексеев, С.Г. Безволев

Актуализация линейной телескопической модели осадки свай 718

А.З. Тер-Мартirosян, В.П. Кивлюк, И.О. Исаев

Изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при компенсационном нагнетании вблизи котлована 734

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.П. Заторский, К.А. Шумилов

Модель прогнозного расчета технико-экономических показателей префаб-модуля 745

Е.В. Макиша

Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели 764

В.В. Пащенко, В.А. Мурленко, С.Н. Гуреев, В.С. Евстратов

Практическое применение дополненной реальности и технологий информационного моделирования в процессах капитального строительства 777

Требования к оформлению научной статьи 785

CONTENTS

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

Nikolai A. Senkin, Valery S. Vasilev

Actual operation of structures: the interaction of structures and the soil base of lattice supports of overhead power lines 637

Sergey A. Solovyev, Oleg E. Kopeykin, Anastasia A. Solovyeva

Probabilistic method of designing steel trusses for a given level of reliability and durability 655

Anatoly V. Alekseytsev, Konstantin V. Yurusov

A study on the bearing capacity of compressed corrosion-affected reinforced concrete elements subjected to transverse impulse loading 667

Ngoc Tuyen Vu, Yevgeniya N. Polyakova

Deformation of concrete under volumetric stress state 683

Aleksandr R. Tusnin, Ekaterina K. Gracheva

Generalized parameters of composite membrane structures 694

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Viktor V. Mironov, Evgeniy A. Erofeev, Yuriy A. Ivanyushin, Anastasiya A. Kadyseva

Analysis of a pullout force acting on vacuum anchors in sea wave energy converters 709

Andrej G. Alekseev, Stepan G. Bezvolev

Updating the linear telescopic pile settlement model 718

Armen Z. Ter-Martirosyan, Valery P. Kivlyuk, Ilya O. Isaev

A change in the stress-strain state of soil mass due to compensation grouting near an excavation 734

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Savely P. Zatorskiy, Konstantin A. Shumilov

Model of predictive calculation of technical and economic indicators of the prefabricated module 745

Elena V. Makisha

Formation of estimate documentation based on a building information model 764

Vasilisa V. Pashchenkova, Vladislav A. Murlenko, Sergey N. Gureev, Victor S. Evstratov

Practical application of augmented reality and information modelling technologies in capital construction processes 777

Requirements for research paper design 785

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2:621.315.66:624.151

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654

Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи

Николай Александрович Сенькин^{1,2}, Валерий Сергеевич Васильев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);

г. Санкт-Петербург, Россия;

² Россети Научно-технический центр (Россети НТЦ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное промышленное освоение территорий Сибири и Дальнего Востока осуществляется, прежде всего, за счет интенсивного строительства магистральных воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 220–500 кВ. Решение вопроса действительной работы конструкций опор и фундаментов представляет актуальность для обеспечения требуемой надежности электроснабжения ответственных потребителей в тяжелых климатических и транспортно отдаленных условиях. Перемещения фундаментов в слабых грунтах приводят к существенному изменению напряженно-деформированного состояния надфундаментной конструкции, создавая аварийные повреждения и инциденты на ВЛ. Однако современное проектирование опор ВЛ выполняется отдельно для фундаментов и надфундаментной конструкции. Объект исследования — стальные типовые решетчатые опоры ВЛ новой унификации, предмет исследования — взаимодействие конструкций, фундаментов и основания в сооружениях типа решетчатых опор ВЛ.

Материалы и методы. Осуществлен литературный обзор по теме взаимодействия конструкций, фундаментов и грунтового основания стальных опор ВЛ, включающий анализ экспериментальных и теоретических результатов, свидетельствующий об отсутствии методики единого расчета системы «конструкция, фундаменты и грунтовое основание» для опор ВЛ, основанной на использовании современных программных комплексов (ПК). Приведены результаты натурных испытаний опор ВЛ с фундаментами на грунтовых основаниях, проведенных в 1979–1980 гг. при участии автора, свидетельствующие о значительных перемещениях фундаментов при нагрузках основных расчетных режимов.

Результаты. В результате расчета таких систем с фундаментами на деформирующемся грунтовом основании с использованием современных ПК получены новые результаты, существенно отличающиеся от полученных при натурных испытаниях на жестком силовом полу или на неподвижных фундаментах.

Выводы. Выполнение расчетов конструкций опор и фундаментов системы «конструкция – фундамент – основание» обеспечивает более точное проектирование конструкций для каждого пикета трассы, так называемое индивидуальное проектирование, что значительно сократит расход стали и бетона по сравнению с типовым проектированием, а также повысит надежность конструкций опор и фундаментов ВЛ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, решетчатые опоры воздушных линий электропередачи, фундаменты, перемещения фундаментов, совместная работа конструкций и грунтового основания, модель стержневого аналога, индивидуальное проектирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сенькин Н.А., Васильев В.С. Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654

Автор, ответственный за переписку: Николай Александрович Сенькин, senkin1952@yandex.ru.

Actual operation of structures: the interaction of structures and the soil base of lattice supports of overhead power lines

Nikolai A. Senkin^{1,2}, Valery S. Vasilev¹

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);

St. Petersburg, Russian Federation;

² Rosseti Scientific and Technical Center; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern industrial development of the territories of Siberia and the Far East is carried out primarily due to the intensive construction of main overhead power transmission lines (overhead lines) with a voltage of 220–500 kV. Solving the issue of the actual operation of the structures of supports and foundations is of high relevance to ensure the required reliability of power supply to responsible consumers in severe climatic and transport remote conditions. The movement of foundations in weak soils leads to a significant change in the stress-strain state of the above-foundation structure, creating emergency damage and incidents on overhead lines. However, the modern design of overhead line supports is carried out separately for foundations and above-foundation structures. The object of the study is steel standard lattice overhead line supports of a new unification, and the subject of the study is the interaction of structures, foundation and basement in structures such as lattice overhead line supports.

Materials and methods. A literary review on the interaction of structures, foundations and the ground base of steel overhead line supports was performed, including an analysis of experimental and theoretical results on this topic, indicating the absence of a unified calculation methodology for the “structures, foundations and ground base” system for overhead line supports based on the use of modern software systems. The results of field tests of overhead line supports with foundations on ground bases, conducted in 1979–1980 with the participation of the author, are presented, indicating significant movements of foundations under loads of the main design modes.

Results. As a result of the calculation of such systems with foundations on a deformable soil base using modern software systems, new results were obtained that differ significantly from those obtained during field tests on a rigid power floor or on fixed foundations.

Conclusions. Performing calculations of structures of supports and foundations in the “construction – foundation – base” system provides a more accurate design of structures for each picket of the route, the so-called individual design, which will significantly reduce the consumption of steel and concrete compared with standard design, as well as increase the reliability of structures of supports and foundations of overhead lines.

KEYWORDS: metal structures, lattice supports of overhead power lines, foundations, movement of foundations, joint work of structures and soil foundation, the model of the rod analogue, individual design

FOR CITATION: Senkin N.A., Vasilev V.S. Actual operation of structures: the interaction of structures and the soil base of lattice supports of overhead power lines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):637-654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Senkin, senkin1952@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Статья основана на результатах исследования действительной работы опор воздушных линий электропередачи (ВЛ), в частности поиске решений в области совместной работы их конструкций и грунтового основания. Публикация посвящена памяти выдающихся исследователей в области действительной работы металлических конструкций (МК) зданий и сооружений: профессора Московского инженерно-строительного института (МИСИ) Евгения Ивановича Беленя (1913–1989), ведущего ученого научной школы расчетного моделирования и проектирования МК [1], и профессора Ленинградского инженерно-строительного института (ЛИСИ) Владимира Антоновича Трулля (1916–1996), талантливого ученого — испытателя и разработчика новых конструктивных форм металлических конструкций, в том числе опор и фундаментов ВЛ [2].

Е.И. Беленя — ученик самого авторитетного ученого и организатора российской строительной науки Николая Станиславовича Стрелецкого (1885–1967), основателя теории предельных состояний в металлических конструкциях [3]. В период Великой Отечественной Войны в декабре 1941 г. профессор Н.С. Стрелецкий открыл единую кафедру металлических конструкций в Новосибирском инженерно-строительном институте (НИСИ) в связи с эвакуацией кафедр металлоконструкций МИСИ и Днепропетровского ИСИ (ДИСИ), заведующим которой после отъезда Н.С. Стрелецкого стал Е.И. Беленя. В этот особый период в НИСИ

проводилась актуальная разработка научно-исследовательских тем в области действительной работы стальных конструкций, в частности «Сварка на морозе» и «Восстановление конструкций промышленных зданий». В послевоенный период и в настоящее время площадка строительных кафедр НИСИ (Сибстрин) притягательна для проведения актуальных научно-технических конференций и совещаний (рис. 1).

Термин «действительная работа МК» отражает уточнение расчетных схем, нагрузок и воздействий, включая анализ аварийных повреждений эксплуатирующихся МК с целью совершенствования действующих норм, приводя в итоге к уточненным расчетным схемам с обеспечением большей прочности, жесткости, надежности и, как правило, приводя к существенному сокращению материальных и трудовых затрат, а также сроков строительства.

В составе комплекса факторов, характеризующих действительную работу конструкций ВЛ, параметр совместной работы конструкций опоры и фундамента в грунтовом основании имеет значимый характер, как подчеркнул профессор В.А. Трулля во введении в докторской диссертации (1966) [4], «особенно при внешней статической неопределенности конструкции».

В действующих нормативных документах СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» сформулированы требования, что «сооружение и его основание следует рассматривать в единстве,



Рис. 1. Совещание заведующих кафедрами металлических конструкций (Новосибирск, 09.1977), слева направо: проф., д.т.н.: В.А. Трулль, Б.А. Сперанский, А.В. Сильвестров, Е.И. Беленя, В.В. Бирюлев, Я.М. Лихтарников (из архива В.А. Трулля) [2]

Fig. 1. Meeting of heads of departments of metal structures (Novosibirsk, 09.1977), from left to right: professors, Doctor of Technical Sciences: V.A. Trull, B.A. Speransky, A.V. Silvestrov, E.I. Belenya, V.V. Biryulev, Ya.M. Likharnikov (from the archive of V.A. Trull) [2]

т.е. учитывать их взаимодействие», но отсутствуют рекомендации по их выполнению, поэтому необходима разработка методики совместного расчета конструкций и основания сооружений башенного типа, включая решетчатые опоры ВЛ, что является целью настоящей публикации. Такая методика, разработанная на основе современного программного обеспечения, позволит определять усилия в элементах конструкции опоры исходя из реальных физико-механических характеристик грунтового основания на конкретном пикете трассы ВЛ.

По результатам экспериментально-теоретических НИР по исследованию действительной работы промышленных зданий, проведенных в 1940–1960 гг. МИСИ совместно с трестом «Проектстальконструкция» и ЦНИИСК под руководством выдающихся ученых профессоров Н.С. Стрелецкого [3], С.А. Бернштейна, Г.А. Шапиро [5, 6], а позже профессора Е.И. Беленя [7, 8], в частности, выявлено, что при загрузке рамы вертикальной крановой или горизонтальными нагрузками наибольшее значение имеет учет деформативности основания фундаментов. Так, в автореферате докторской диссертации Е.И. Беленя сообщается, что «при расчете рам без учета деформативности основания фундаментов перемещения рам оказываются меньше действительных на 20–50 %

при внецентренном нагружении колонн и в 3–4 раза — при действии горизонтальных нагрузок» [8].

Тема действительной работы строительных конструкций получила высокое развитие в работах исследователей из ЛИСИ под руководством выдающегося ученого профессора Николая Николаевича Аистова (1884–1967) [9], основателя лаборатории механических испытаний и заведующего кафедрой металлических конструкций и испытания сооружений (МКиИС), а позже — под руководством его ученика профессора В.А. Трулля. В 1950-х гг. руководством страны перед энергетиками и строителями были поставлены грандиозные задачи по разработке новых систем передачи электроэнергии на дальние расстояния с целью создания Единой энергетической системы СССР. Большим творческим коллективом исследователей из разных организаций (ЛИСИ, ВНИПИ «Энергосетьпроект», Союзтехэнерго (ОРГРЭС), ВНИИЭлектроэнергетики (Россети Научно-технический центр), ЦНИИСК, НИИОСП, ЛПИ, Проектстальконструкция и др.) выполнены работы по созданию новых конструктивных форм опор и фундаментов воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ, включая разработку типовых конструкций, а также массовые испытания натур-

ных образцов непосредственно на строящихся ВЛ и их физических моделей в лабораториях [10].

На основе анализа выполненных работ В.А. Трулль в 1966 г. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи», в которой определил и решил основные задачи, относящиеся к тематике действительной работы конструкций опор ВЛ: испытания опор ВЛ на основе метода предельных состояний; работа опорных плит при отрицательных реакциях башмаков; местная устойчивость опор ВЛ; работа монтажных болтовых соединений; прочность некоторых сварных соединений заводской сварки. Следует отметить, что до настоящего времени сохранили актуальность вопросы совместной работы конструкций и основания, взаимодействия конструкций опор в единой линейной системе ВЛ, динамической работы проводов, грозозащитных тросов и конструкций опор ВЛ, упомянутые в диссертационной работе [4]. Также в 1980-х гг. под руководством профессора В.А. Трулля и при участии автора проведены натурные испытания решетчатых радиобашен Ленинградского радицентра № 11 в Поповке, которые показали, что вынужденное вертикальное перемещение нижних опорных узлов сварной конструкции, даже небольшой величины, приводит к значительному повышению напряжений в элементах нижней части стальной решетчатой башни. Например, деформация, как искривление опорной плоскости с вертикальным выходом одной опорной точки из плоскости трех других, всего на 11 мм приводит к дополнительным значительным напряжениям 40 МПа в нижнем поясе радиобашен типа «Заря» [11]. Авторские теоретические, модельные и натурные экспериментальные исследования в 1978–1980 гг. свидетельствовали о значительном влиянии осадок и горизонтальных перемещений фундаментов на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкции сооружений башенного типа. В кандидатской диссертации автора разработана методика совместного расчета опоры ВЛ как единой системы «конструкция, фундаменты и грунтовое основание», которая включила упругий стержневой аналог, заменяющий фундамент и грунтовое основание, и созданы авторские программы простых упругих совместных расчетов на Фортран-IV, основанных на методе сил [12, 13].

С 2020 г. в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) продолжены исследования действительной работы конструкций ВЛ 35–750 кВ, которые выполняются аспирантами и магистрантами кафедры металлических и деревянных конструкций [14]. Главным отличием является использование современных программных комплексов (ПК) для расчета стержневых систем (LIRA Soft10, SCAD++, Plaxis и т.п.) при известных нагрузках, инженерно-гео-

логических характеристиках грунтового основания и местности.

Изучение совместной работы конструкций, фундаментов и грунтового основания сооружений башенного типа имеет давнюю историю, но современные исследования отличаются глубиной в связи с использованием ПК для моделирования ВЛ как многоэлементной системы. Так, исследовательская группа 22.07 (Фундаменты) Международного Совета по большим электроэнергетическим системам (CIGRE) на уровне обзора привела данные о видах фундаментов опор ВЛ и методах их расчета. Рассматривая отдельные фундаменты как основной вид для опирания решетчатых опор ВЛ, предложено ограничить нежелательную разницу в осадках между соседними фундаментами, например, посредством устройства распорок между ними. Кроме того, на основании действующего европейского стандарта IEC 60826:2017 «Overhead transmission lines — Design criteria» группа 22.07 рекомендовала концепцию системного проектирования ВЛ в виде ряда механически взаимосвязанных компонентов (опор, фундаментов, проводов, изоляторов и т.п.) [15].

Британскими исследователями проведены полномасштабные полевые испытания до разрушения трех односвайных стальных фундаментов из труб диаметром 610 мм длиной 3, 4 и 6 м совместно со стойками ВЛ 25 кВ на изгибающий момент и горизонтальные нагрузки, приложенные к верхней части стоек. Исследования показали, что боковое смещение сваи на уровне поверхности грунта связано с ее поворотом в грунте как жесткого элемента для коротких свай длиной 3–4 м и как гибкого — при их длине 6 м. Причем измеренная точка поворота сваи длиной 3 м находится в грунте на глубине 2,5 м, 4 м — 3,5 м, 6 м — 4,5 м соответственно [16], что представляется важным для разработки моделей взаимодействия конструкций и грунтового основания односвайных опор ВЛ.

Научные исследования, проводимые Шербрукским университетом (Канада, Квебек), свидетельствуют о необходимости учета взаимодействия грунта и конструкции опор ВЛ для оценки их реакции на динамические импульсные нагрузки, в частности, при сейсмическом проектировании. В результате расчета с использованием специализированного ПК ADINA, апробированного на расчетах системы «конструкция – основание» опор ВЛ, выявлено существенное различие в действующих динамических импульсных нагрузках при изменении жесткости грунтового основания. Так, максимальный импеданс или ударный отклик на конструкцию свободной решетчатой опоры ВЛ с базой 4,0 м при жестком основании на 14,3 % выше, чем при песчаном основании, и на 33,3 % выше при связном глинистом основании. Кроме того, принята модель гистерезисного деформирования грунта, тогда экстремаль-

ное значение вертикального подъема фундамента при максимальном импульсе продолжительностью 0,5 с создается в итоге нелинейного расчета с результатом, превышающим в 2,03 раза упругий подъем [17]. Следовательно, традиционный подход при сейсмическом проектировании конструкций опор ВЛ, пренебрегающем деформативностью фундамента в грунтовом основании, приводит к значительным отклонениям от реальной работы конструкций и фундаментов, особенно в случае существенных деформаций.

В работе индийских ученых представлены результаты расчета методом конечных элементов (МКЭ) стальной двухцепной угловой опоры типа D-30 (предельный угол поворота ВЛ — 30°) ВЛ 110 кВ как единой пространственной стержневой системы, включающей стержневой аналог свайного фундамента и грунтового основания в виде упругих податливых пружин, прикрепленных к сваям. Для опоры с К-образной полураскосной решеткой, опертой всеми четырьмя башмаками на 4 сваи диаметром 0,4 м и длиной 10 м каждая, горизонтальное перемещение вершины опоры составило 105,2 мм, а при неподвижных башмаках на жестком основании — 96,6 мм или на 8,9 % ниже, что свидетельствует о необходимости исследования взаимодействия конструкций и основания в составе действительной работы конструкций опор ВЛ [18].

Значимые результаты приведены в научных работах китайских ученых, посвященных действительной работе конструкций опор ВЛ в особых районах с тяжелыми климатическими условиями, сейсмичностью и просадочными грунтовыми основаниями, характерными для угольных горных выработок [19–24]. Фундаменты опор многих линий электропередачи построены на пустотах или в местах возможных провалов в зонах подземной угледобычи. Возникающая неравномерная осадка и горизонтальные перемещения фундаментов перераспределяют нагрузки на них и создают дополнительные напряжения в конструкции, что может привести к аварийному падению опор ВЛ [19]. В следующей статье представлена online-система мониторинга положения (наклона) опор и перемещений фундаментов ВЛ в режиме реального времени с погрешностью измерений 1,03 %, оснащенная датчиками ускорений и угловой скорости. На основании показанных в публикации графиков «нагрузка – перемещение» фундаментов следует вывод о существенно нелинейном характере деформирования фундаментов в грунте основания, горизонтальные перемещения которых на 30–50 % превышают линейные деформации [20]. Научная школа профессора Qianjin Shu в течение долгого времени изучает вопросы действительной работы конструкций ВЛ. Так, в труде «Исследование характеристик защиты от смещения фундамента и оценка надежности опоры электропередачи 500 кВ в зоне просадки

горных выработок» [21] приведены результаты расчета трех типов анкерно-угловых опор ВЛ 500 кВ на ПК ANSYS Finite Element с учетом геометрической и физической нелинейности с важным выводом: допустимое значение вертикального либо горизонтального одиночного смещения фундамента не должно превышать 0,5 % от расстояния между фундаментами опоры. Например, для одноцепной опоры КТ-16 типа «рюмка» высотой 54,0 м и размерами в плане 9,40 × 13,66 м допустимые значения перемещений фундамента, исходя из расчета критических элементов по предельным состояниям на нагрузки рабочих режимов, составили 86–181 мм, что в относительном виде 0,63–1,71 % соответственно.

В работах киевских исследователей [25, 26] предложена система моделирования работы строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений посредством стержневых аналогов, обеспечивающих расчеты при помощи программных комплексов на основе МКЭ. Выдающиеся отечественные ученые [27–29] уделяли большое внимание вопросам учета совместной работы строительных конструкций и фундаментов сооружений, а также грунтов основания, при расчетах фундаментов и грунтовых оснований. В действующих нормах (п. 5.6 СП 22.133330.2016 «Основания зданий и сооружений»), построенных на основе их исследований, расчетная схема основания принимается в виде линейно-деформируемого полупространства, а данный учет сводился к определению коэффициентов работы в интервале 1,0–1,4 при вычислении расчетного сопротивления грунта в основании сооружений в зависимости от типа конструктивной схемы (гибкой либо жесткой) и вида грунтов. Кроме того, п. 4.2 СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» требует, чтобы «расчетные схемы и основные предпосылки расчета отражали действительные условия работы стальных конструкций, а в расчетных схемах учитывались деформационные характеристики опорных закреплений конструкций, оснований и фундаментов», однако и по сей день отсутствуют расчетные методики по совместным расчетам строительных конструкций, в частности стальных решетчатых опор воздушных линий электропередачи, с учетом совместной работы с фундаментами и грунтовым основанием, что является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В июне 1980 г. автор, аспирант кафедры МКИИС ЛИСИ, участвовал в натурных испытаниях стальной решетчатой двухцепной анкерно-угловой опоры типа УМ-102 общей высотой 22,5 м и базой 6,5 м (расстояние между фундаментами), установленной в 1929 г. в годы первых пятилеток на ВЛ 110 кВ «Кожухово-Пахра» (Подмосковье, Орехово-Борисово) для подвески медных проводов МГ-95

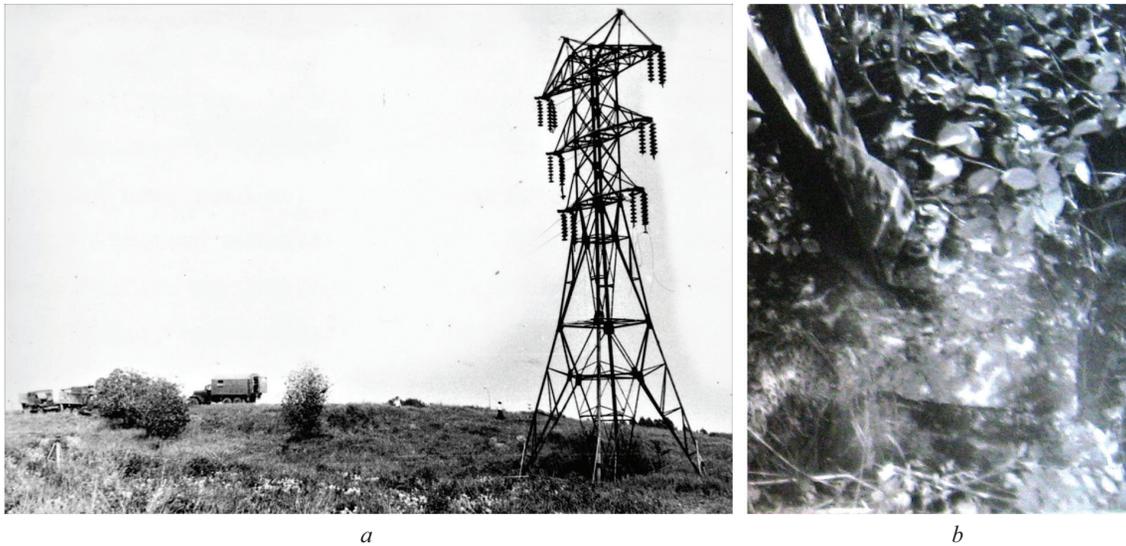


Рис. 2. Натурные испытания анкерно-угловой опоры УМ-102 до разрушения, нагруженной посредством силовых канатов и тяговой автомобильной техники (а); поврежденные пояс и раскос из-за выдернутого монолитного бетонного фундамента при нагрузке 100 % (b) (фото автора, 06.1980)

Fig. 2. Full-scale tests of the UM-102 anchor-angle support before destruction, loaded by means of power ropes and traction vehicles (a); damaged belt and brace due to a pulled monolithic concrete foundation at a load of 100 % (b) (photo by the author, 06.1980)

и грозотросов марки С50. Фундаменты опоры выполнены монолитными бетонными ступенчатыми с заглублением 2,5 м и плитой 2,0 × 2,0 м (рис. 2).

В процессе испытаний проводились измерения усилий в тяговых тросах при помощи врезных динамометров, напряжений в элементах посредством тензодатчиков, отклонения оси опоры от вертикали те-

долитом и вертикальных перемещений фундаментов нивелиром по миллиметровым рейкам, прикрепленным к поясам. Кроме того, автор измерял горизонтальные перемещения четырех башмаков, прикрепленных к четырем фундаментам посредством анкерных болтов, на каждой ступени нагружения при помощи прогибомеров ПАО-6 ценой деления 0,01 мм (рис. 3).

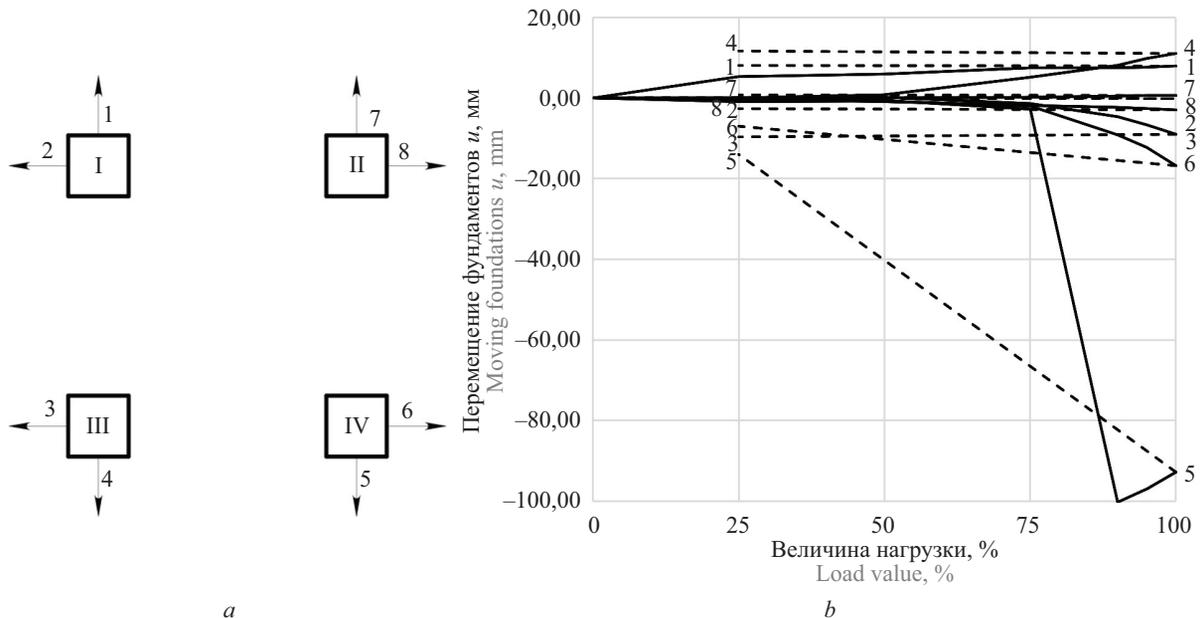


Рис. 3. Идентификация фундаментов и обозначение направлений их горизонтальных перемещений (а); графики горизонтальных перемещений фундаментов, мм, по восьми направлениям (цифрами) в зависимости от численного значения нагрузки P , %: нагружение — сплошная линия, разгрузка — пунктир (b)

Fig. 3. Identification of foundations and designation of the directions of their horizontal movements (a); graphs of horizontal movements of foundations, mm, in 8 directions (in numbers) depending on the numerical value of the load P , %: loading — solid line, unloading — dotted line (b)

Испытания анкерно-угловой опоры УМ-102 и промежуточной опоры ПМ-102 осуществлялись по заказу Мосэнерго силами ПО Союзтехэнерго (ОРГРЭС) испытателями Е.П. Горбатовым и А.И. Орловой под руководством заместителя начальника цеха электрических сетей Л.В. Яковлева с целью проверки несущей способности конструкций стальных опор и фундаментов ВЛ 110–220 кВ, находящихся в эксплуатации более 30 лет и имеющих коррозионные повреждения элементов нижних частей. Натурные испытания опоры УМ-102 проводились на нагрузки II нормального режима с нагружением ступенями 25, 50, 75, 90, 95 и 100 % (и последующей разгрузкой до 25 %) от расчетного значения испытательной нагрузки при помощи лебедок тяжелых автомобилей повышенной проходимости и полиспастов на якорях. При нагрузке 105 % разрушился якорь полиспаста и испытания данного цикла не были доведены до разрушения опоры УМ-102. Тем не менее объем полученных данных позволил выполнить анализ усилий в раскосах и поясах нижней части опоры, который свидетельствует о почти линейном характере деформирования элементов, а также перемещений верха фундаментов при нагрузках 25 % и далее, почти до 100 % их величины. Однако при нагрузке величиной от 75 % анкерный (или выдергиваемый) фундамент IV стал интенсивно перемещаться противоположно направлению 5, а при нагрузке в интервале 100–105 % выдергиваемые фундаменты III и IV (рис. 3) оторвались от грунтового основания, поднялись по вертикали на 64 и 67 мм соответственно и потеряли связь с грунтовым основанием. Указанная аварийная си-

туация произошла по причине дефицита грунта обратной засыпки анкерного фундамента IV. Кроме того, в рамках кандидатской диссертации автор [12] выявил асимметрию в передаче горизонтальной испытательной нагрузки $P = 206$ кН, действующей в плоскости симметрии конструкции, между четырьмя фундаментами: большая часть нагрузки P (60 %) передалась на сжатые фундаменты, вызвав их фактическую перегрузку и перенапряжение сжатых поясов и раскосов.

В 1979 г. автор, аспирант кафедры МКиИС ЛИСИ, благодаря помощи преподавателей кафедры и сотрудников механической лаборатории ЛИСИ имени профессора Н.Н. Аистова, организовал натурные испытания анкерно-угловой опоры типа «американка» для ВЛ 110 кВ волховского типа, разработанной в 1920-х гг. академиком Г.О. Графтио и профессором Ленинградского политеха Н.П. Виноградовым. Для испытаний использовалось близкое расположение двух таких опор: одна опора — правая служила для создания испытательной нагрузки при помощи талрепа, вторая левая была испытуемой, а между ними протягивался силовой трос с динамометром (рис. 4).

Вертикальные перемещения фундаментов замерялись при помощи нивелира по миллиметровым рейкам, горизонтальные перемещения — посредством двух прогибомеров типа ПАО-6 разработки Н.Н. Аистова и В.Т. Овчинникова, устраиваемых от каждого опорного узла. Для определения относительных деформаций в каждом поперечном сечении элемента нижней части опоры устанавливались три рычажных тензометра ТА-2 базой 100 мм раз-

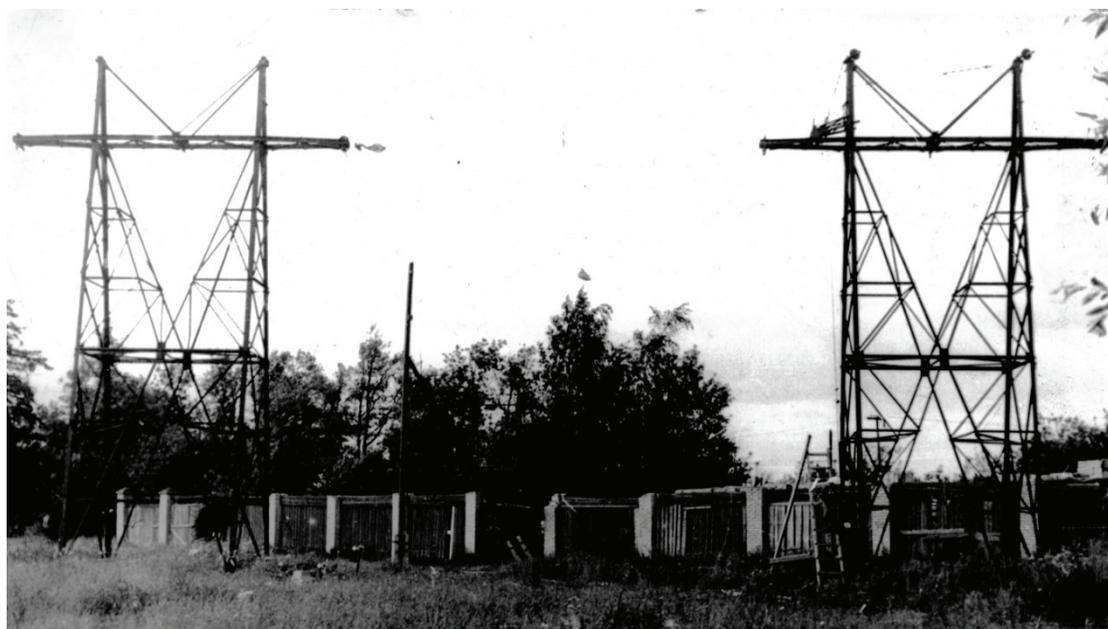


Рис. 4. Натурные испытания опоры волховского типа ВЛ 110 кВ на бетонных монолитных фундаментах, нагруженной при помощи силового каната и талрепа (Ленинград, 1979)

Fig. 4. Full-scale tests of the volkhov type 110 kV overhead line support on concrete monolithic foundations loaded by means of a power rope and a lanyard (Leningrad, 1979)

работки Н.Н. Аистова. Результаты выполненных натурных испытаний свидетельствуют о возможности линеаризации процессов деформирования грунтового основания и усилий в элементах конструкции башенного типа. Указанные результаты подчеркивают актуальную необходимость анализа влияния перемещений фундаментов на усилия в элементах опоры и исследования взаимодействия конструкций и фундаментов сооружений [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованы известные методы расчета методом конечных элементов в ПК LIRA и ПК PLAXIS, при помощи которых получены новые результаты расчета стальных конструкций, фундаментов и грунтовых оснований. Такие факторы, как перемещения фундаментов, неравномерность осадок фундаментов и учет податливости грунтового основания, обеспечили разработку более надежных и экономичных конструктивно-технологических решений стальных опор ВЛ.

Объектом исследования стали стальные типовые решетчатые опоры ВЛ новой унификации (индекс «н» в марке опоры), отличающиеся наличием горизонтальных распорок, соединяющих башмаки опоры, предметом исследования — влияние перемещений фундаментов на усилия в элементах конструкций и взаимодействие конструкций и фундаментов в сооружениях башенного типа. Также в результате натурных испытаний опор ВЛ на фундаментах получены новые результаты, существенно отличающиеся от полученных при натурных испытаниях на жестком силовом полу или на неподвижных фундаментах.

Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволили проектировать промышленные и электросетевые объекты с учетом дополнительных уточняющих факторов. Поэтому актуальными стали научно-исследовательские работы по изучению действительной работы стальных конструкций промышленных зданий и электросетевых конструкций. Выполнен анализ результатов натурных испытаний конструкций воздушных линий электропередачи, посредством которых выявляются неизвестные факты, свидетельствующие о действительной работе конструкций опор ВЛ, прежде всего, перемещений фундаментов на деформирующихся грунтовых основаниях.

Апробация расчетной модели

В соответствии с нормативными требованиями по верификации (п. 5.1.13 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений») для создания корректной расчетной модели опоры ВЛ «конструкция – фундамент – основание» необходимо экспериментально установить значения принимаемых интерфейсов и в целом корректность расчета таких фундаментов в ПК PLAXIS. Для этого использова-

ны результаты натурального эксперимента кандидата технических наук И.П. Разоренова по испытанию горизонтально нагруженного фундамента № 3, выполненного в 1955 г. [30]. Характеристики грунта приняты аналогично данным натурального эксперимента [30], проведенного на правом берегу р. Яуза (суглинок: объемный вес — $1,75 \text{ г/см}^3$, угол внутреннего трения — 23° , сцепление — $0,001\text{--}0,005 \text{ Н/см}^2$, число пластичности — 14, влажность — 16 %). При натурных испытаниях системы «конструкция – фундамент – основание» было сделано 40 циклов «нагрузка – разгрузка», но на совмещенном графике (рис. 5) представлены только четыре, потому что с увеличением числа циклов «загрузка – разгрузка» полные и остаточные деформации грунта затухают, но упругая доля деформаций остается неизменной. Иными словами, с каждым последующим циклом нагрузки – разгрузки работа грунта подобна гистерезису с почти неизменными параметрами и характеризуется почти линейной зависимостью. Надфундаментная часть задана условно с обеспечением необходимой жесткости конструкции. Таким образом, в расчете в ПК PLAXIS, как и в эксперименте, на каждом цикле произведено ступенчатое нагружение в последовательности до достижения предельного значения $P = 17,5 \text{ кН}$ (ступени: 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 и 17,5 кН) с последующей разгрузкой (пунктирная линия).

Расчетная кривая PLAXIS аналогична результатам эксперимента и хорошо согласуется на начальных циклах нагружения. Имеются некоторые различия с каждым последующим циклом, отличающиеся общим перемещением фундаментов в грунтовом основании. Следовательно, такой подход к разработке расчетной модели дает достаточно достоверные значения перемещений на первом цикле нагружения и может быть использован для описания нелинейных перемещений фундаментов анкерно-угловых опор, имеющих почти постоянные нагрузки в связи с односторонним тяжением проводов и грозотросов в сторону внутреннего угла поворота оси ВЛ. При этом нелинейный процесс деформирования грунта может приближенно определяться переменным модулем деформации грунта $\bar{E}_{\text{гр}}$, изменяющимся на каждой ступени нагружения (штрихпунктирная линия $\bar{E}_{\text{гр}}$ на рис. 5).

Стоит отметить, что представленные в статье результаты натурных испытаний подтверждают определенную особенность действительной работы грунтового основания при последовательном циклическом приложении нагрузки, когда графики «нагрузка – разгрузка» будут подобны графикам гистерезиса со значительной долей упругих деформаций грунта, характерных для многократного нагружения – разгружения. Такой упругий характер работы грунтов рекомендуется принять для оснований промежуточных опор, характеризующихся воздействием горизонтальных ветровых нагрузок

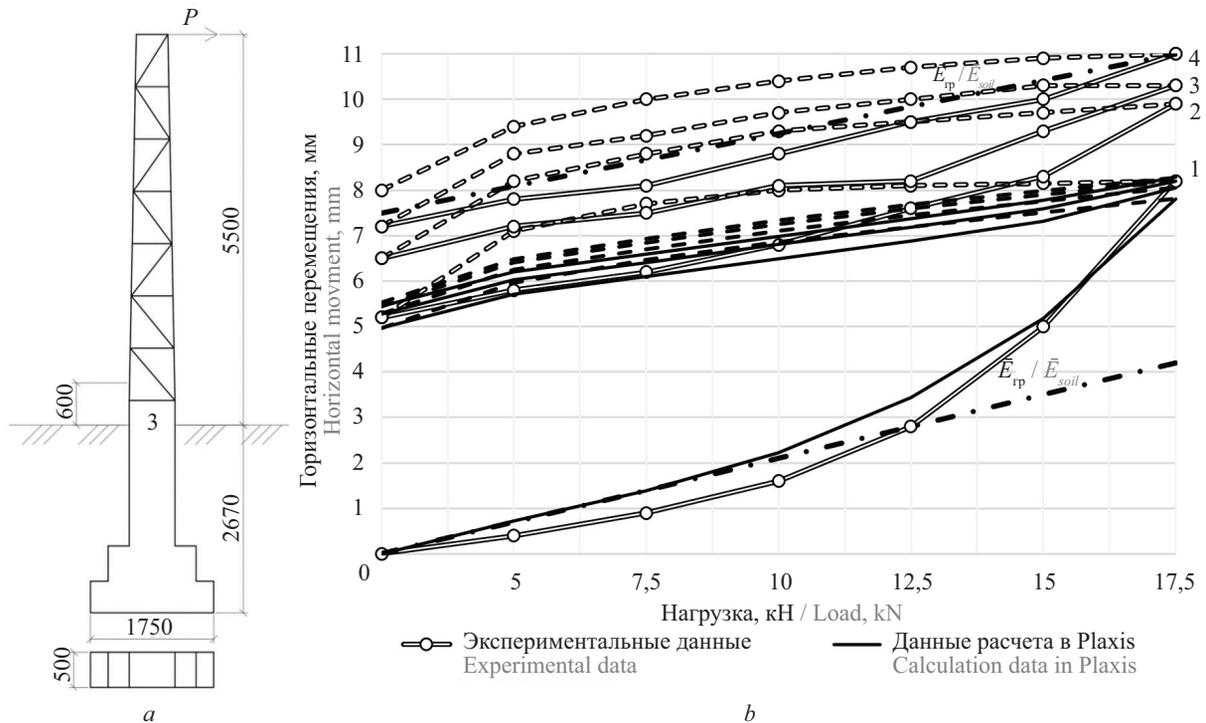


Рис. 5. Схема испытаний (размеры, мм) (а); сравнение результатов эксперимента и расчетов в ПК PLAXIS (цифры справа — номера циклов нагружения): графики зависимости горизонтальных перемещений, мм, от нагрузки P , кН (b)
Fig. 5. Test scheme (dimensions, mm) (a); comparison of experimental results and calculations in the Plaxis PC (the numbers on the right are the numbers of loading cycles): graphs of the dependence of horizontal displacements, mm, on the load P , kN (b)

с переменным направлением и значением. Здесь деформирование грунта по гистерезису целесообразно аппроксимировать линейной упругой зависимостью с постоянным модулем деформации грунта $E_{тр}$ на всех ступенях нагружения (штрихпунктирная линия $E_{тр}$ на рис. 5) при использовании модели стержневого аналога (МСА).

Метод совместного расчета упругой системы «конструкция – фундамент – основание»

Одним из вариантов учета податливости грунтового основания является замещение всей подземной части (фундамент + грунтовое основание) стержневым аналогом МСА («паучок»), который представлен в расчетной схеме опоры (рис. 6). Расчетные параметры аналога определяются требованиями равенства угловых и линейных перемещений на обресе фундамента в грунтовом основании, соответствующих перемещениям пространственной стержневой модели [13].

Считая ось поворота фундамента неподвижной, уравнения для вертикальных, горизонтальных и угловых перемещений принимают вид, представленный в формулах [13]:

$$I = \frac{a^4 \cdot E_{тр}}{144 \cdot E \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{\omega_z^3}{3 \omega_\phi}}, \quad (1)$$

где I — момент инерции условной стальной балки; a — ширина квадратной части фундамента; $E_{тр}$ — модуль деформации грунта; E — модуль упругости

стали; μ — коэффициент Пуассона грунта; ω_z, ω_ϕ — безразмерные коэффициенты формы фундамента [26];

$$l = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_z}{3 \cdot \omega_\phi}} \cdot \sqrt{2}; \quad (2)$$

$$h = h_0, \quad (3)$$

где h — конструктивная высота фундамента; h_0 — расчетная высота до точки поворота в грунте O_1 (рис. 6).

Кроме того, для апробации результатов расчета сооружения с учетом податливости грунта предлагается моделирование полной системы «конструкция – фундамент – основание» в программной системе PLAXIS, поэтому реализуется модель PLAXIS (MPL).

Основными нагрузками для опор ВЛ являются собственный вес, тяжение и вес проводов, а также ветровая и гололедная нагрузки. При этом при изменении скорости и направления ветрового напора фундаменты преимущественно промежуточной опоры работают попеременно как на вдавливание, так и на выдергивание, происходит уплотнение грунта под его подошвой. Поэтому для реализации действительной работы конструкции и основания была выбрана модель упрочняющегося грунта Hardening soil (HS) для расчета в PLAXIS.

В основном ПК PLAXIS разработан для решения задач инженерной геотехники и инженерной

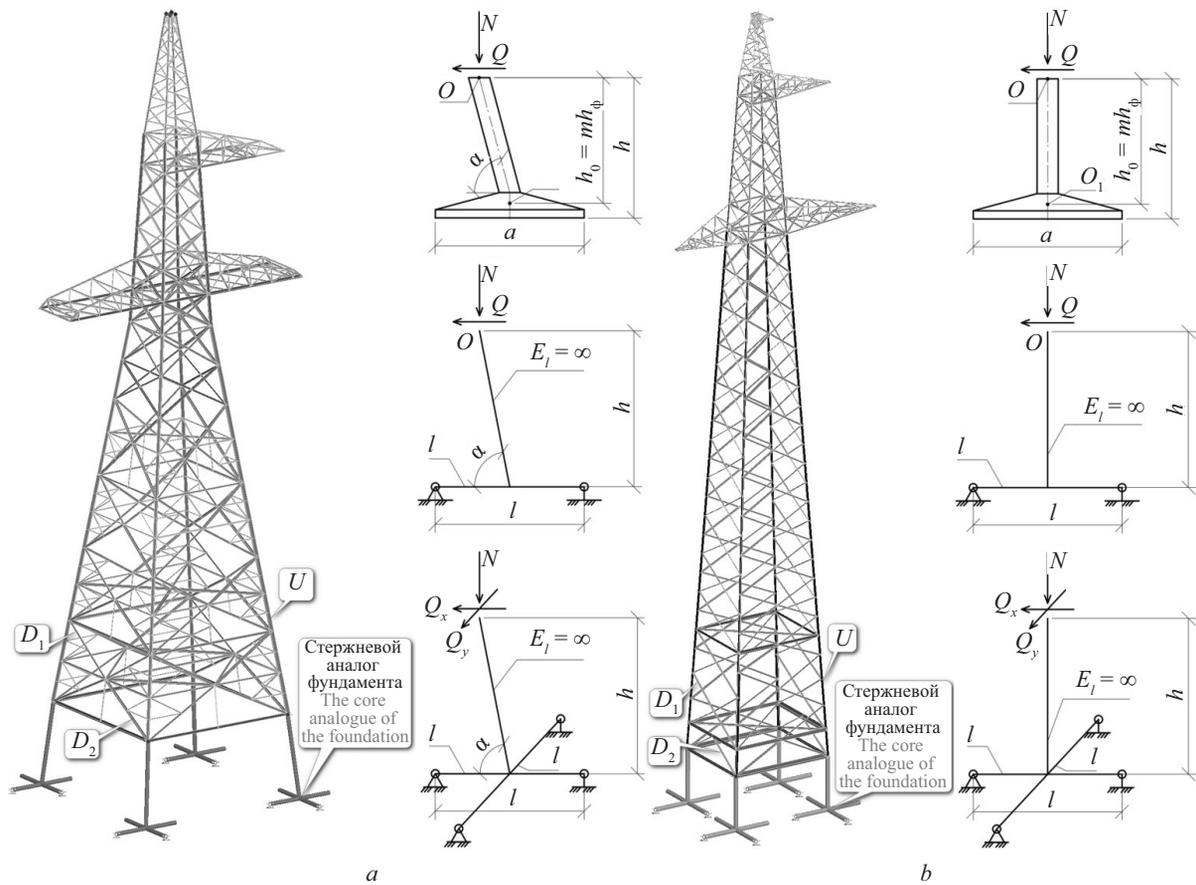


Рис. 6. Расчетные схемы анкерно-угловой опоры У330н-1+14 (а) и промежуточной опоры П330н-1+6,0 (б), включающие стержневой аналог фундамента в грунтовом основании

Fig. 6. Calculation schemes of the anchor-angular support U330n 1+14 (a) and the intermediate support P330n-1+6.0 (b), including a core analogue of the foundation in the ground base

геологии, при этом акценты на проектирование надфундаментного сооружения отсутствуют. Например, одно из допущений в данной расчетной модели — отсутствие шарнирных узлов, иными словами, все узлы приняты жесткими. Также стоит отметить более продолжительный по времени расчет MPL по сравнению с МСА.

Наибольшее влияние учет податливости грунтового основания оказывает на нижнюю часть сооружения, поэтому особое внимание уделяется распределению усилий в элементах нижних подставок опор (рис. 7, 8).

Учет податливости грунтового основания и анализа его влияния на усилия в элементах подставки П1.2-6.0 промежуточной опоры типа П330н-1+6.0

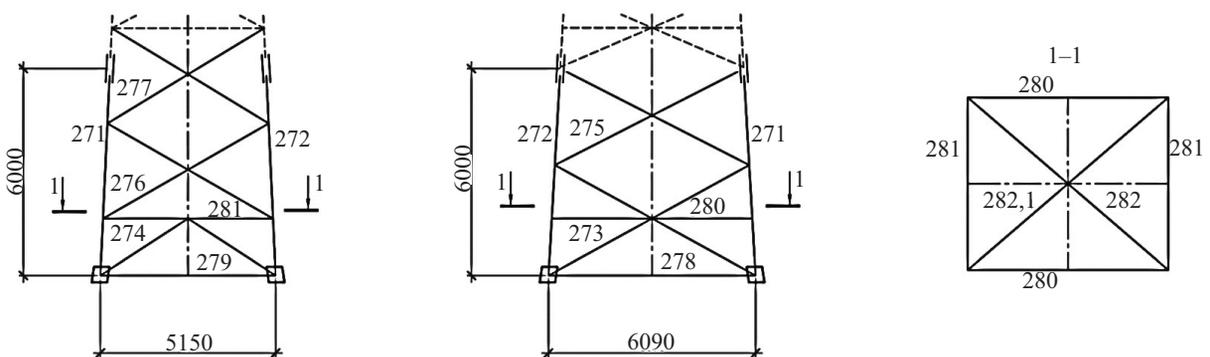


Рис. 7. Схема элементов подставки типа П1.2-6,0 в составе промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 (цифрами показаны номера элементов)

Fig. 7. Scheme of the elements of the stand type P1.2-6.0 as part of the intermediate support type P330n-1+6.0 (the numbers show the item numbers)

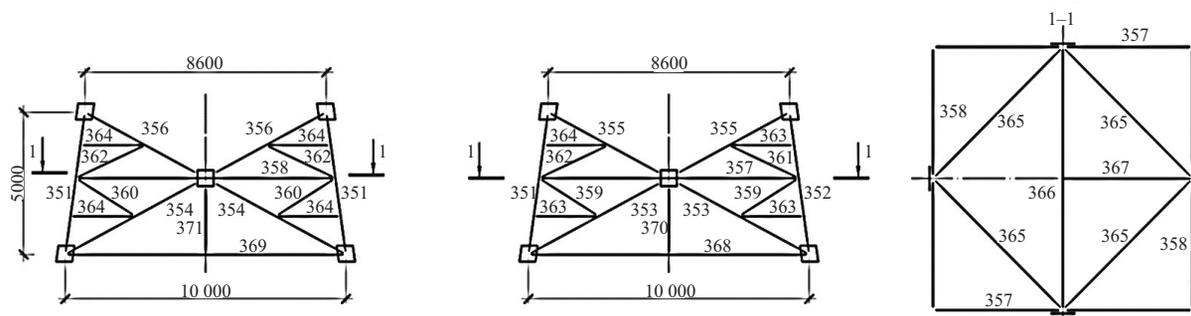


Рис. 8. Схема элементов подставки типа П1.2-5,0 в составе анкерно-угловой опоры типа У330н-1+14 (цифрами показаны номера элементов)

Fig. 8. Scheme of the elements of the stand type P1.2-5.0 as part of the anchor-angular support type U330n-1+14 (the numbers show the item numbers)

выполнен в зависимости от переменного параметра в системе — модуля деформации грунта E_{rp} , эквивалентно переводимого в модуль инерции балок стержневого аналога I по модели МСА по формулам (1)–(3) (табл. 1, 2, рис. 9). При последующих

исследованиях модуль деформаций E_{rp} целесообразно заменить на E_B , модуль деформации грунта при разгрузке и повторном нагружении в соответствии с п. 5.3.8 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений».

Табл. 1. Результаты расчета системы по модели МСА при изменении модуля деформации грунта E_{rp} (опора П330н-1+6,0)

Table 1. The results of calculating the system according to the MSA model when changing the soil deformation modulus E_{soil} (support P330n-1+6.0)

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели МСА, кН The forces in the elements of the the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MCA model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , MPa					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ MPa, %
	10	50	100	150	200	
271/272	-283,280	-275,960	-274,640	-274,180	-273,970	3,29
273	-12,166	-11,910	-11,978	-12,020	-12,049	2,10
274	-3,886	-3,804	-3,790	-3,783	-3,778	2,76
275	-12,704	-12,633	-12,640	-12,649	-12,659	0,56
276	-2,874	-2,807	-2,791	-2,784	-2,777	3,35
277	-1,569	-1,530	-1,522	-1,519	-1,516	3,33
278	13,699	-9,944	-16,506	-19,246	-20,757	251,52
279	-9,788	-9,521	-9,459	-9,435	-9,422	3,74

Табл. 2. Вариант расчета системы по модели MPL при изменении модуля деформации грунта E_{rp} (опора П330н-1+6,0)

Table 2. The results of calculating the system according to the MPL model when changing the soil deformation modulus E_{soil} (support P330n-1+6.0)

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , MPa					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ MPa, %
	10	50	100	150	200	
271/272	-275,28	-275,55	-275,53	-275,56	-275,59	0,11
273	-11,97	-12,00	-12,00	-12,00	-12,00	0,25

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
274	-11,40	-10,51	-10,38	-10,27	-10,20	-
275	-13,16	-13,18	-13,18	-13,18	-13,19	0,23
276	-2,47	-2,46	-2,45	-2,45	-2,45	0,81
277	-1,99	-1,98	-1,97	-1,96	-1,97	1,51
278	-13,27	-15,34	-15,68	-15,99	-16,10	21,33
279	-10,60	-10,80	-10,88	-11,01	-11,09	4,62

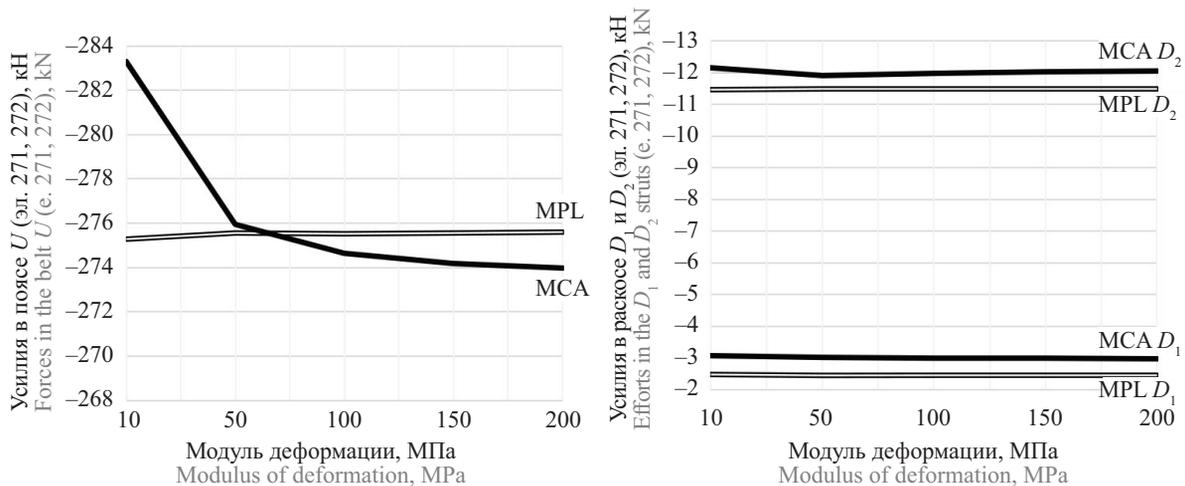


Рис. 9. Усилия, кН, в элементах промежуточной опоры П330н-1+6,0 в зависимости от модуля деформации грунта E_{rp}
Fig. 9. The forces, kN, in the elements of the intermediate support P330n-1+6.0 depending on the modulus of deformation of the soil E_{soil}

Расчет анкерно-угловой опоры произведен аналогично расчету промежуточной опоры и представлен в табл. 3, 4 и графически на рис. 10. Здесь при последующих исследованиях также следует

применить переменный модуль деформации грунта \bar{E}_{rp} на каждой ступени нагружения, который целесообразно принять равным секущему модулю деформации первичного нагружения при 50%-ной

Табл. 3. Результаты расчета системы по модели МСА при изменении модуля деформации грунта E_{rp}

Table 3. The results of the calculation of the system according to the MCA model with the soil deformation module E_{soil}

Номер элемента (рис. 8) Item Number (fig. 8)	Усилия в элементах подставки П1.2-5,0 типовой анкерно-угловой опоры У330н-1+14 по модели МСА, кН The forces in the elements of the stand P1.2-5.0 of the standard anchor-angular support U330n-1+14 according to the MCA model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
351/352	-685,88	-778,64	-799,61	-807,96	-812,39	18,44
353/354	-76,89	-66,63	-64,73	-64,21	-64,05	16,70
355/356	-45,40	-56,73	-59,63	-60,86	-61,60	35,67
368/369	-33,51	-34,53	-34,59	-35,74	-37,99	13,37

Табл. 4. Результаты расчета системы по модели MPL при изменении модуля деформации грунта E_{rp}

Table 4. The results of calculating the system using the MPL model when changing the soil deformation modulus E_{soil}

Номер элемента (рис. 8) Item Number (fig. 8)	Усилия в элементах подставки П1.2-5,0 типовой анкерно-угловой опоры У330н-1+14 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-5.0 of the standard anchor-angular support U330n-1+14 according to the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
351/352	-723,94	-726,41	-726,79	-726,98	-727,07	0,43
353/354	-54,75	-55,17	-55,07	-55,02	-54,97	0,75
355/356	-52,95	-52,55	-52,42	-52,37	-52,34	1,16
368/369	-48,97	-46,23	-45,69	-45,51	-45,40	7,29

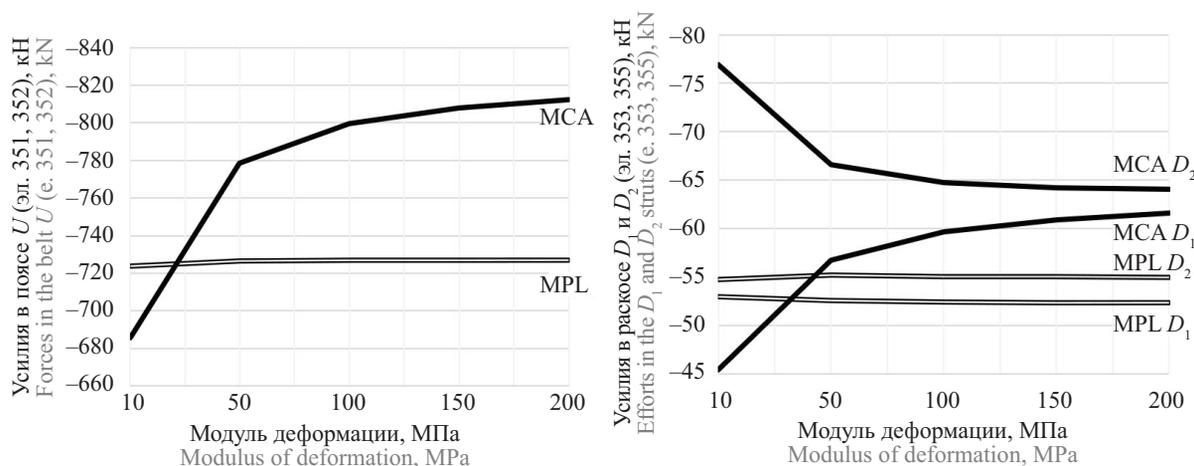


Рис. 10. Усилия, кН, в элементах подставки опоры У330н-1+14 в зависимости от модуля деформации грунта E_{rp}

Fig. 10. The forces, kN, in the elements of the support support U330n-1+14, depending on the modulus of deformation of the soil E_{soil}

прочности грунта E_{50} (ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»).

Как показано в диссертационной работе автора [12], в действительности грунты основания имеют конечную и отличную от нуля податливость. В соответствии с п. 5.3.20 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» расчет оснований опор ВЛ независимо от геотехнической категории допускается выполнять по таблицам Приложения А. В табл. А.1 и А.3 для песчаных и глинистых грунтов при максимальном коэффициенте пористости $e = 0,75$ определяется минимально допустимое численное значение модуля деформации грунта $E_{rp} = 10$ МПа, которое следует принять за предельное нормативное значение модуля деформации грунта. Возведение фундаментов опор ВЛ на слабых грунтовых основаниях приводит к значительным осадкам и перемещениям, поэтому строительство на таких основаниях с модулем деформаций ниже

$E_{rp} = 10$ МПа, как правило, связано с их дорогостоящим укреплением. Итак, назначается левая граница интервала допустимых значений $E_{rp} = 10-\infty$ МПа, а правая граница соответствует недеформируемому жесткому основанию, свойственному жесткому силовому полу или несмещаемым фундаментам. Далее для правой границы применено численное значение $E_{rp} = 200$ МПа, которое в расчетах дает численные значения усилий, почти соответствующие недеформируемым грунтовым основаниям. Стоит заметить, что современная практика испытаний натуральных образцов опор ВЛ, например на площадке цеха по испытанию элементов ВЛ (ЦИВЛ) АО «Фирма ОРГРЭС» в г. Хотьково Московской обл., основывается на результатах испытаний опор с неподвижными башмаками на силовом жестком железобетонном полу. Так выполняется сертификация новых конструкций опор и фундаментов, но это не отвечает действительной работе конструкций на деформирующемся грунтовым основании.

Из анализа результатов расчета промежуточной опоры по моделям МСА и MPL (табл. 1, 2) следует, что перемещения фундаментов оказывают наибольшее влияние на изменение усилий в нижних распорках подставки опоры ПЗ30н-1+6,0. Для модели МСА в элементе № 278 усилие меняет знак и возрастает в 2,5 раза на интервале $E_{гр} = 10\text{--}200$ МПа (табл. 1). Для остальных элементов изменением усилий можно пренебречь, так как они составляют менее 5 %, по причине небольших углов отклонения поясов ствола опоры от вертикали и наличия межфундаментных горизонтальных распорок.

В качестве первого приближения для расчета системы «конструкция – фундамент – основание» анкерно-угловой опоры УЗ30н-1+14 применен единый модуль деформации $E_{гр}$ как для промежуточной опоры ПЗ30н-1+6,0. Сравнение результатов натурального эксперимента И.Ф. Разоренова [30] и расчетов с использованием ПК PLAXIS свидетельствует о достаточной точности расчета перемещений фундаментов в грунтовом основании по ПК PLAXIS для практики проектирования ВЛ (рис. 5). Однако расчет системы «конструкция – фундамент – основание» по модели MPL приводит к неопределенным значениям усилий и перемещений в элементах надфундаментной конструкции, так как отсутствует реакция или изменение усилий и перемещений в ее элементах при изменении модуля деформации грунта при расчете как промежуточной (рис. 9), так и анкерно-угловой опор (рис. 10).

Как следует из табл. 3, 4 и рис. 9, 10, система «фундаменты – основание» успешно заменяется на стержневой аналог или «паучки» по модели МСА, а далее выполняется расчет надфундаментной конструкции с «паучками» с применением ПК LIRA Soft10, SCAD++ и других, использующих МКЭ (рис. 6). Расчет успешно выполняется в случае упругого грунтового основания с модулем деформации грунта $E_{гр}$, как правило, свойственного промежуточным опорам. Таким образом, предложен новый метод совместного расчета упругой системы «конструкция – фундамент – основание» с определением перемещений фундаментов узлов надфундаментной конструкции и усилий в ее элементах, отличающийся использованием современных программных комплексов, основанных на методике конечных элементов.

Однако при продолжении исследований для расчета анкерно-угловых опор в связи с нелинейной работой основания потребуются разработка специальных моделей, имитирующих физическую нели-

нейность работы железобетонных конструкций фундаментов и грунтового основания с учетом фактора времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты представленных натуральных экспериментальных исследований при нагрузках основных расчетных режимов свидетельствуют о наличии существенных перемещений фундаментов, достигающих 60 мм и более, и значительном влиянии деформаций грунтового основания на НДС элементов конструкций опор и фундаментов ВЛ.

Разработаны расчетные схемы системы «конструкция – фундаменты – основание» промежуточной и анкерно-угловой решетчатой опоры ВЛ 330 кВ для ПК PLAXIS и LIRA с моделями стержневого аналога (MPL и МСА соответственно) и установлен интервал допустимых значений модуля деформаций грунта $E_{гр} = 10\text{--}\infty$ МПа, позволяющий определять предельные значения усилий в элементах надфундаментной конструкции опоры ВЛ с учетом перемещений фундаментов.

Система «конструкция – фундаменты – основание» со стержневой моделью МСА преобразована в единую стержневую систему, усилия в элементах которой определены при помощи известных программных комплексов на основе МКЭ, что приводит к достоверным решениям для промежуточных опор ВЛ.

Использование модели MPL в ПК PLAXIS дает достоверные значения перемещений, удовлетворяющие соответствующие опытным значениям из натурального эксперимента при испытании бетонного фундамента, но при расчете системы «конструкция – фундамент – основание» такая модель не дает корректных значений усилий в элементах надфундаментной конструкции при переменном модуле деформаций грунта.

При продолжении изучения взаимодействия конструкций и грунтового основания решетчатых анкерно-угловых опор ВЛ в последующих публикациях предполагается исследование НДС конструкций на крупномасштабной модели в условиях длительного сопротивления грунтовых оснований, характеризующихся нелинейными деформациями под нагрузкой.

Выполнение расчетов конструкций опор и фундаментов системы «конструкция – фундамент – основание» обеспечит более точное проектирование конструкций для каждого пикета трассы ВЛ, так называемое индивидуальное проектирование ВЛ, что значительно сократит расход стали и бетона на строительство ВЛ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудишин Ю.И., Михалев Н.Я., Туснин А.Р., Беленя Е.И. Из серии «Наши юбиляры». М. : МГСУ, 2013. 40 с.
2. Санжаровский Р.С., Сенькин Н.А. Профессор В.А. Трулль — талантливый ученый и педагог (к 100-летию со дня рождения) // Архитектура, строительство, транспорт. 2016. С. 70–73.
3. Стрелецкий Н.С. Избранные труды. М. : Стройиздат, 1975. 422 с.
4. Трулль В.А. Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1966. 43 с.
5. Исследование действительной работы стальных конструкций промышленных цехов : сб. ст. / под ред. проф. С.А. Бернштейна. М. ; Л. : Госстройиздат, 1938. 196 с.
6. Шапиро Г.А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. М. : Госстройиздат, 1952. 285 с.
7. Беленя Е.И. Экспериментальное исследование предельных состояний комбинированных стальных рам при статической нагрузке // Доклады межвузовской конференции по испытаниям и сооружениям. 1958. С. 120–129.
8. Беленя Е.И. Действительная работа и расчет поперечных рам стальных каркасов одноэтажных производственных зданий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1959. 26 с.
9. Хомуцкий Н.Ф., Аистов Н.Н., Квасников Е.Н., Лобовиков А.С. Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт за 125 лет. 1832–1957. Л. : Госстройиздат, 1958. 211 с.
10. Черных А.Г., Рыбнов Е.И., Сенькин Н.А., Шмидт А.Б., Гордиенко В.Е., Астахов И.В. и др. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации. СПб., 2022. 356 с. EDN IDBLHY.
11. Трулль В.А., Сенькин Н.А. Исследование влияния перемещений фундаментов на усилия в стержнях сооружений башенного типа // Металлические конструкции и испытания сооружений : межвузовский тематический сб. тр. 1980. С. 25–32.
12. Сенькин Н.А. Исследование совместной работы конструкций и основания сооружений башенного типа : дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1980. 143 с.
13. Сенькин Н.А. Учет совместной работы конструкций и основания при проектировании стальных опор линий электропередачи // Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены : тр. Междунар. конф. по геотехнике ТК-207 ISSMGE. 2014. Т. 2. С. 93–100.
14. Сенькин Н.А., Белякова Т.Е., Мальчиков Д.А., Васильев В.С. Действительная работа стальных конструкций воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше // Металлические конструкции. 2022. Т. 28. №. 1. С. 5–18. EDN FEJAMT.
15. Herman A., Cuer N.R., DiGiola A.M.Jr., Vanner M.J. The Design of Transmission Line Support Foundations — an Overview 206 // CIGRE. Working Group. 2002. 68 p.
16. Richards D.J., Powrie W., Blake A.P. Full-scale tests on laterally loaded railway overhead line equipment mast foundations // Géotechnique. 2023. Vol. 73. Issue 3. Pp. 189–201. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.312
17. Varghese A., Thomas J. Influence of Soil-Structure Interaction on the Structural Performance of D-30 Transmission Line Tower // Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2019. Pp. 61–71. DOI: 10.1007/978-981-13-1202-1_5
18. Jendoubi A., Legeron F. Soil-Structure Interaction Effects on Dynamic Behaviour of Transmission Line Towers // Computers, Materials & Continua. 2022. Vol. 70. Issue 1. Pp. 1461–1477. DOI: 10.32604/cm.2022.018832
19. Zhang G., Liu M., Cheng S., Wang M., Zhao C., Zhao H. et al. Research on Transmission Line Tower Tilting and Foundation State Monitoring Technology Based on Multi-Sensor Cooperative Detection and Correction // Energy Engineering. 2024. Vol. 121. Issue 1. Pp. 169–185. DOI: 10.32604/ee.2023.027907
20. Zhang S., Fan Z., Sun L., Qiu J. Influence of Goaf on Stability of Transmission Line Tower Foundation // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 358. P. 010003. DOI: 10.1051/e3sconf/202235801003
21. Shu Q. Research on anti-foundation-displacement performance and reliability assessment of 500 kV transmission tower in mining subsidence area // The Open Civil Engineering Journal. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 87–92. DOI: 10.2174/1876523801104010087
22. Shu Q., Yuan G., Huang Z., Ye S. The behaviour of the power transmission tower subjected to horizontal support's movements // Engineering Structures. 2016. Vol. 123. Pp. 166–180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.027
23. Shu Q., Yuan G., Jia L., Wang Y.A., Zhou J. A new simple design method for the plate foundation of a transmission tower in subsidence area // The Open Civil Engineering Journal. 2016. Vol. 10. Issue 1. Pp. 251–265. DOI: 10.2174/1874149501610010251
24. Zhuang X., Wen W., Zhou R., Tao G., Li W. The Effect of Pore Solution on the Hysteretic Curve of Expansive Soil under Cyclic Loading // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2023. Vol. 19. Issue 7. Pp. 1963–1981. DOI: 10.32604/fdmp.2023.026348
25. Barabash M., Tomashebskiy A. Bar analogues for modelling of building structures // International Journal for Computational Civil and Structural Engi-

neering. 2020. Vol. 16. Issue 3. Pp. 100–106. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-100-106

26. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. Киев : Будивельник, 1967. 184 с.

27. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л. : Стройиздат, 1988. 415 с.

28. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб. : Геореконструкция, 2014. 328 с.

29. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981. 317 с.

30. Разоренов И.Ф. Экспериментальные исследования устойчивости одиночных фундаментов при действии горизонтальной нагрузки // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства. Вып. 13: Основания и фундаменты. 1955. С. 55–145.

Поступила в редакцию 31 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 20 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Александрович Сенькин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; главный эксперт; **Россети Научно-технический центр (Россети НТЦ)**; 115201, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3; SPIN-код: 1344-9412, РИНЦ ID: 1035786, Scopus: 57309511900, ResearcherID: 9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru;

Валерий Сергеевич Васильев — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7280-4781, РИНЦ ID: 1205053, ORCID: 0000-0002-9247-9818; valera-vasilev-99@mail.ru.

Вклад авторов:

Сенькин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, сбор и обработка материала, написание и научное редактирование, итоговые выводы.

Васильев В.С. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, разработка графической части, разработка программ расчета и реализация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kudishin Yu.I., Mikhalev N.Ya., Tusnin A.R., Belenya E.I. *From the series "Our anniversaries"*. Moscow, MGSU, 2013; 40. (rus.).

2. Sanzharovskiy R.S., Senkin N.A. Professor V.A. Trull' is a talented scientist and teacher (on the occasion of the 100th anniversary of his birth). *Architecture, Construction, Transport*. 2016; 70-73. (rus.).

3. Streletskiy N.S. *Selected works*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 422. (rus.).

4. Trull' V.A. *Investigation of the actual operation of overhead transmission line support structures : abstract. dis. ... doc. technical sciences*. Leningrad, 1966; 43. (rus.).

5. *Investigation of the actual operation of steel structures of industrial workshops : collection of articles / ed. by prof. S.A. Bernstein*. Moscow ; Leningrad, Gosstroyizdat, 1938; 196. (rus.).

6. Shapiro G.A. *Actual operation of steel structures in industrial workshops*. Moscow, Gosstroyizdat, 1952; 285. (rus.).

7. Belenya E.I. Experimental investigation of the limiting conditions of combined steel frames under static load. *Reports of the interuniversity conference on testing and facilities*. 1958; 120-129. (rus.).

8. Belenya E.I. *Actual work and calculation of transverse frames of steel frames of single-storey industrial buildings : abstract. diss. ... doc. technical sciences*. Moscow, 1959; 26. (rus.).

9. Khomutetskiy N.F., Aistov N.N., Kvasnikov E.N., Lobovikov A.S. *Leningrad Order of the Red Banner of Labor Institute of Civil Engineering for 125 years. 1832–1957*. Leningrad, Gosstroyizdat, 1958; 211. (rus.).

10. Chernykh A.G., Rybnov E.I., Senkin N.A., Schmidt A.B., Gordienko V.E., Astakhov I.V. et al. *The study of the work of metal and wooden structures and the assessment of their service life, taking into account the operating conditions*. St. Petersburg, 2022; 356. EDN IDBLHY. (rus.).

11. Trull' V.A., Senkin N.A. Investigation of the effect of foundation movements on the forces in the rods of tower-type structures. *Metal structures and testing of structures : inter-university thematic collection of works*. 1980; 25-32. (rus.).

12. Senkin N.A. *Investigation of the joint work of structures and foundations of tower-type structures : dis. ... cand. of technical sciences*. 1980; 143. (rus.).

13. Senkin N.A. Consideration of the joint work of structures and foundations in the design of steel poles of power transmission lines. The interaction of foundations and structures. *Underground structures and retaining walls : Proceedings of the International Conference on Geotechnics TK-207 ISSMGE*. 2014; 2:93-100. (rus.).
14. Senkin N., Belyakova T., Malchikov D., Vasilyev V. The actual operation of steel structures of overhead power lines with a voltage of 35 kV and above. *Metal Constructions*. 2022; 28(1):5-18. EDN FEJAMT. (rus.).
15. Herman A., Cuer N.R., DiGiola A.M.Jr., Vanner M.J. The Design of Transmission Line Support Foundations – An Overview 206. *CIGRE. Working Group*. 2002; 68.
16. Richards D.J., Powrie W., Blake A.P. Full-scale tests on laterally loaded railway overhead line equipment mast foundations. *Géotechnique*. 2023; 73(3):189-201. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.312
17. Varghese A., Thomas J. Influence of Soil-Structure Interaction on the Structural Performance of D-30 Transmission Line Tower. *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*. 2019; 61-71. DOI: 10.1007/978-981-13-1202-1_5
18. Jendoubi A., Legeron F. Soil-Structure Interaction Effects on Dynamic Behaviour of Transmission Line Towers. *Computers, Materials & Continua*. 2022; 70(1):1461-1477. DOI: 10.32604/cmc.2022.018832
19. Zhang G., Liu M., Cheng S., Wang M., Zhao C., Zhao H. et al. Research on Transmission Line Tower Tilting and Foundation State Monitoring Technology Based on Multi-Sensor Cooperative Detection and Correction. *Energy Engineering*. 2024; 121(1):169-185. DOI: 10.32604/ee.2023.027907
20. Zhang S., Fan Z., Sun L., Qiu J. Influence of Goaf on Stability of Transmission Line Tower Foundation. *E3S Web of Conferences*. 2022; 358:010003. DOI: 10.1051/e3sconf/202235801003
21. Shu Q. Research on anti-foundation-displacement performance and reliability assessment of 500 kV transmission tower in mining subsidence area. *The Open Civil Engineering Journal*. 2011; 5(1):87-92. DOI: 10.2174/1876523801104010087
22. Shu Q., Yuan G., Huang Z., Ye S. The behaviour of the power transmission tower subjected to horizontal support's movements. *Engineering Structures*. 2016; 123:166-180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.027
23. Shu Q., Yuan G., Jia L., Wang Y.A., Zhou J. A new simple design method for the plate foundation of a transmission tower in subsidence area. *The Open Civil Engineering Journal*. 2016; 10(1):251-265. DOI: 10.2174/1874149501610010251
24. Zhuang X., Wen W., Zhou R., Tao G., Li W. The Effect of Pore Solution on the Hysteretic Curve of Expansive Soil under Cyclic Loading. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2023; 19(7):1963-1981. DOI: 10.32604/fdmp.2023.026348
25. Barabash M., Tomashebskyi A. Bar analogues for modelling of building structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020; 16(3):100-106. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-100-106
26. Klepikov S.N. *Calculation of structures on an elastic base*. Kyiv, Budivelnik, 1967; 184. (rus.).
27. Dalmatov B.I. *Soil mechanics, foundations and foundations*. Leningrad, Stroyizdat, 1988; 415. (rus.).
28. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. *The basics of joint calculations of buildings and foundations*. St. Petersburg, Georeconstruction, 2014; 328. (rus.).
29. Tsyrovich N.A., Ter-Martirosyan Z.G. *Experimental studies of the stability of single foundations under the action of horizontal load*. Moscow, Higher School, 1981; 317. (rus.).
30. Razorenov I.F. Experimental studies of the stability of single foundations under the action of horizontal load. *Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction. Issue 13: Foundations and foundations*. 1955; 55-145. (rus.).

Received July 31, 2024.

Adopted in revised form on March 20, 2025.

Approved for publication on March 20, 2025.

B I O N O T E S : **Nikolai A. Senkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; chief expert; **Rosseti Scientific and Technical Center**; build. 3, 22 Kashirskoe shosse, Moscow, 115201, Russian Federation; SPIN-code: 1344-9412, ID RSCI: 1035786, Scopus: 57309511900, ResearcherID: 9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru;

Valery S. Vasilev — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7280-4781, ID RSCI: 1205053, ORCID: 0000-0002-9247-9818; valera-vasilev-99@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nikolai A. Senkin — scientific guidance, research concept, collection and processing of material, writing and scientific editing, final conclusions.

Valery S. Vasilev — collection and processing of material, writing of the source text, development of the graphic part, development of calculation programs and implementation.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666

Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности

Сергей Александрович Соловьев, Олег Евгеньевич Копейкин,
Анастасия Андреевна Соловьева

Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование полных вероятностных методов оценки и обоснования уровня надежности строительных конструкций является логичным этапом эволюции текущих подходов, которые называют полувариантными или детерминистическими. Полные вероятностные методы позволяют получить количественную оценку надежности строительных конструкций в виде вероятности отказа, что делает возможным сравнение безопасности эксплуатации различных видов строительных конструкций из разных материалов в одной системе.

Материалы и методы. Применены методы генерации данных на основе статистической информации о случайных параметрах в математических моделях предельного состояния стальных ферм. Преимущество метода генерации данных — простота программной реализации в широко распространенных программных комплексах и устойчивость результата в случае нелинейных моделей предельного состояния и совокупности различных функций распределения вероятностей случайных величин. Также вместо консервативного представления расчетной схемы фермы как последовательной системы из независимых элементов (стержней) предлагается учитывать особенности конструирования стальной фермы и уточнять модели отказов всей системы, что позволит получить более объективную оценку уровня надежности в виде вероятности отказа.

Результаты. На численном примере показана необходимость учета коэффициента вариации прочности стали стержней фермы при анализе надежности, так как даже при выполнении требований к нормативной обеспеченности прочности стали влияние коэффициента вариации на вероятность отказа остается существенным. Оценка вероятности отказа как отдельных стержней фермы, так и фермы в целом как системы дает возможность выполнить технико-экономическое сравнение конструктивных вариантов и оптимизацию технического решения с учетом фактора надежности.

Выводы. Предложенный подход к вероятностному проектированию позволяет выразить количественно уровень надежности стальной фермы, а также спрогнозировать его изменение со временем. Использование вероятностных методов проектирования и анализа надежности строительных конструкций дает возможность более детально исследовать безопасность эксплуатации зданий и сооружений. Применение прямых статистических данных о снеговых нагрузках с метеостанций и о показателях несущей способности элементов с заводов-производителей позволяет получить более экономичное решение за счет уточнения случайных параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вероятностное проектирование, надежность, ферма, долговечность, безопасность, вероятность отказа, случайные параметры

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01035 (URL: <https://rscf.ru/project/23-79-01035/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев С.А., Копейкин О.Е., Соловьева А.А. Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 655–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666

Автор, ответственный за переписку: Олег Евгеньевич Копейкин, kopeykinoe@vogu35.ru.

Probabilistic method of designing steel trusses for a given level of reliability and durability

Sergey A. Solovyev, Oleg E. Kopeykin, Anastasia A. Solovyeva
Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of full probabilistic methods for assessing and analyzing the structural reliability level is a logical stage in the evolution of current methods, which are called semi-probabilistic or deterministic. Full probabilistic methods make it possible to obtain a quantitative assessment of the structural reliability in the form of failure probability and to compare the safety of different types of structures made of different materials in one system.

Materials and methods. The paper presents methods of data simulation based on statistical information about random parameters in mathematical models of limit state of steel trusses. The advantage of the method of data simulation is the sim-

licity of programme realization in widespread programme complexes and stability of the result in the case of nonlinear limit state models and a set of different probability distribution functions of random variables. Also, instead of conservative representation of the design scheme of the truss as a sequential system of independent elements (bars), it is proposed to take into account the peculiarities of steel truss design and to specify the failure models of the whole system, which will allow to obtain a more objective assessment of the structural reliability level in the form of failure probability.

Results. The numerical example shows the necessity of taking into account the coefficient of variation of steel strength of the truss bars in reliability analysis, because even if the requirements to the normative strength of steel are met, the influence of the coefficient of variation on the probability of failure remains significant. Estimation of failure probability of both individual truss bars and the truss as a whole as a system allows to perform technical and economic comparison of design variants and optimization of technical solution taking into account the reliability factor.

Conclusions. The proposed approach to probabilistic design makes it possible to quantitatively express the level of reliability of a steel truss, as well as to predict its change with time. The use of probabilistic methods of designing and analyzing the reliability of structures allows for a more detailed study of the operational safety of buildings and structures. The use of direct statistical data on snow loads from meteorological stations and on the indicators of bearing capacity of elements from manufacturing plants will allow to obtain a more economical solution by specifying random parameters.

KEYWORDS: probabilistic design, reliability, truss, durability, safety, failure probability, random parameters

Acknowledgements. The research was funded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035 (URL: <https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>).

FOR CITATION: Solovyev S.A., Kopeykin O.E., Solovyeva A.A. Probabilistic method of designing steel trusses for a given level of reliability and durability. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):655-666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666 (rus.).

Corresponding author: Oleg E. Kopeykin, kopeykinoe@vogu35.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность строительных конструкций является ключевым показателем при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. На текущий момент надежность строительных конструкций обеспечивается за счет использования коэффициентов надежности (запаса) на основе метода предельных состояний, введенного в 1955 г., согласно которому надежность строительного объекта считается обеспеченной, если выполняются требования (критерии) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Такой метод оценки надежности строительного объекта при проектировании или эксплуатации также называют полувариантным: применяются положения теории вероятностей на отдельных этапах (например, обоснование нормативной прочности материала) с последующим введением коэффициентов надежности (запаса). Количественный показатель надежности в нормах на текущий момент не присутствует. В рамках теории надежности строительных конструкций как фундаментальной науки [1, 2] предлагается измерять надежность в виде вероятности безотказной работы P_s или индекса надежности β . Вычисление этих показателей требует использования полных вероятностных расчетов в проектировании строительных конструкций.

В работе [3] отмечается, что за последние несколько десятилетий были разработаны различные методы для вычисления вероятности отказа строительных конструкций. Существующие методы можно условно разделить на пять категорий: I — методы стохастического моделирования, II — методы асимптотической аппроксимации, III — методы, осно-

ванные на статистических моментах, IV — методы, основанные на сохранении вероятности, V — суррогатные методы.

Методы стохастического моделирования включают прямое моделирование методом Монте-Карло (MCS — Monte Carlo Simulation) и его варианты (например, выборку по важности, моделирование подмножеств, метод латинского гиперкуба и др.) [4]. Преимущество такого подхода заключается в простоте реализации и устойчивости метода при сложных математических моделях предельных состояний и комбинации различных типов распределений вероятностей. Недостаток методов стохастического моделирования состоит в высоких вычислительных затратах, требующих больших компьютерных мощностей, если строительный объект моделируется комплексно с большим числом случайных параметров и моделей отказа.

Методы асимптотической аппроксимации используют асимптотический анализ для аппроксимации известного интеграла вероятности отказа. Наиболее известные подходы в этой категории — метод надежности первого порядка (FORM — First Order Reliability Method) [5] и метод надежности второго порядка (SORM) [6]. Эти методы привлекли значительное внимание исследователей и практиков, а также показали свою эффективность во многих практических приложениях. Тем не менее по-прежнему сложно применять FORM и SORM для решения задач, связанных, например, с высокой нелинейностью математических моделей, комбинацией различных распределений вероятностей и множественными областями отказа.

Методы, основанные на статистических моментах, приближенно оценивают вероятность отказа на основе знания статистических моментов функции предельного состояния. Примерами таких ме-

тодов служат методы моментов четвертого порядка [7] и методы максимальной энтропии, базирующиеся на дробных моментах [8]. Однако методы, основанные на моментах, оценивают статистические моменты с использованием методов численного интегрирования и вводят гипотезу о типе распределения функции предельного состояния, что требует дополнительного анализа численных ошибок при использовании таких методов.

Методы, основанные на сохранении вероятности (probability conservation), также направлены на получение распределения вероятности выходной переменной функции предельного состояния, но базируются на принципе сохранения вероятностей без знания статистических моментов. К таким методам относятся метод эволюции плотности вероятности [9] и метод прямого интеграла вероятности [10].

Чтобы снизить вычислительные затраты, суррогатные методы пытаются построить упрощенную модель (метамодель) в качестве замены исходной сложной функции предельного состояния. Характерным примером в этой группе являются методы кригинга [11]. За последнее десятилетие активные методы обучения привлекли большое внимание в сообществе специалистов по анализу надежности.

Для анализа надежности отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений (например, ферм) удобно использовать метод Монте-Карло в связи с простыми моделями отказов, небольшим числом случайных параметров и простой программной реализацией в распространенных математических комплексах. Моделирование методом Монте-Карло также называют методом случайной выборки или в частных случаях — методом статистических испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В математической формулировке надежность — вероятность наличия у несущего элемента строительной конструкции резерва несущей способности g по заданному критерию предельного состояния:

$$P_s = \Pr(g > 0), \quad (1)$$

где g — функция резерва несущей способности, которую можно выразить как $g = R - S$; R — обобщенная

несущая способность элемента; S — обобщенная нагрузка на элемент.

Также надежность может быть выражена через индекс надежности β :

$$\beta = \frac{m_g}{S_g}, \quad (2)$$

где m_g — математическое ожидание резерва несущей способности; S_g — среднеквадратическое отклонение резерва несущей способности.

Вероятность безотказной работы и соответствующий ей индекс надежности, согласно Еврокоду 0, не обязательно представляют действительные частоты отказов, но используются при проверке нормативных положений и для сравнения уровней надежности конструкций. Фактическая частота разрушений существенно зависит от человеческого фактора, который не учитывается при применении коэффициентов надежности напрямую.

В табл. 1 приведены целевые индексы надежности β в соответствии с Eurocode 0 «Basis of structural design».

Например, для стержня стальной фермы условие резерва несущей способности по критерию прочности по пределу текучести стали можно записать в виде:

$$g = \sigma_y \cdot A - \sum_{i=1}^n N_i(P_i), \quad (3)$$

где σ_y — предел текучести стали; A — площадь поперечного сечения стержня фермы; $\sum_{i=1}^n N_i(P_i)$ — продольное усилие в стержне фермы как сумма продольных усилий от различных узловых нагрузок P_i .

Фактически параметры в выражении (3) представляют собой случайные величины, т.е. в каждой возведенной ферме в анализируемом стержне будет свой запас несущей способности. Случайные величины характеризуются функциями (законами) распределения вероятностей или кумулятивными функциями распределения вероятностей $F_x(x)$ (CDF — Cumulative distribution function). Случайные величины в расчетах надежности строительных конструкций принято обозначать волнистой линией над символом. Площадь поперечного сечения стержня фермы является случайной величиной, зависящей от толщины проката t , высоты h и шири-

Табл. 1. Рекомендуемые минимальные значения β по Eurocode 0

Table 1. Recommended minimum values for β by Eurocode 0

Класс надежности Reliability class	Минимальные значения для β Minimum values for β	
	Годовой базовый период Annual base period	50-летний базовый период 50-year base period
RC3	5,2 (>0,99999)	4,3 (0,99998)
RC2	4,7 (0,99999)	3,8 (0,99993)
RC1	4,2 (0,99998)	3,3 (0,99950)

Примечание: в скобках указаны соответствующие значения вероятности безотказной работы в долях.

Note: The corresponding values of the probability of failure-free operation in fractions are given in brackets.

ны b поперечного сечения, которые также — случайные параметры. С учетом введения случайных параметров резерв несущей способности (3) становится случайной величиной. Вероятность того, что он не окажется меньше нуля при определенном совпадении случайных параметров и будет мерой надежности:

$$P_s = \Pr \left[\left(\tilde{g} = \tilde{\sigma}_y \cdot A(\tilde{t}, \tilde{h}, \tilde{b}) - \sum_{i=1}^n N_i(\tilde{P}_i) \right) > 0 \right]. \quad (4)$$

Аналогично можно записать условие предельного состояния для сжатых стержней фермы по критерию устойчивости [12]:

$$\tilde{g} = \tilde{\sigma}_y \cdot A(\tilde{t}, \tilde{h}, \tilde{b}) \times \left(1,003 - 0,034 \cdot \tilde{\lambda}^2 \cdot \frac{\tilde{\sigma}_y}{\tilde{E}} \right) - \sum_{i=1}^n N_i(\tilde{P}_i), \quad (5)$$

где $\tilde{\lambda}$ — гибкость стержня фермы; \tilde{E} — модуль упругости стержня фермы.

При необходимости в математической модели могут быть учтены изгибающие моменты от расцентровки стержней, а формулы (4) и (5) по аналогии преобразованы для случая сжато-изогнутого элемента.

Вероятность отказа P_f на основе классического метода Монте-Карло определяется как:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(X_j) \leq 0], \quad (6)$$

где N — число генераций случайных величин; $I[\cdot]$ — это функция индикатора, имеющая значение 1, если $I[\cdot]$ равно «истина», и значение 0, если $I[\cdot]$ равно «ложь»; X_j — вектор случайных величин функции предельного состояния g .

Генерация случайных величин по основным законам распределения вероятностей (нормальный, равномерный и т.д.) может быть выполнена, например, в программной среде MathCAD. Однако зачастую функция распределения вероятностей может отличаться от известных распределений или представлять собой модель частично непараметрического р-блока [12]. Генерация базовыми подходами тогда становится невозможной. В этом случае можно использовать метод обратного преобразования Н.В. Смирнова: генерируются N значений равномерно распределенной случайной величины u_i в пределах от $[0; 1]$. Значения случайной величины в виде x_i получают методом обратного преобразования $x_i = F^{-1}(u_i)$.

Табл. 2. Предельные статистические параметры для стали С255

Table 2. Statistical limits for steel C255

v_y	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
m_y , МПа / МПа	268,24	272,96	277,85	282,93	288,18	293,64	299,31
S_y , МПа / МПа	8,05	10,92	13,89	16,98	20,17	23,49	26,94

Известно, что в соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» для материалов, прошедших приемочный контроль или сортировку, обеспеченность нормативных значений их прочностных характеристик должна быть не ниже 0,95. Тогда для нормативного значения предела текучести стали (при использовании гипотезы о нормальном распределении вероятностей) справедливо следующее выражение:

$$R_{y,n} = m_y - 1,645 \cdot S_y = m_y - 1,645 \times (m_y \cdot v_y) = m_y \cdot (1 - 1,645 \cdot v_y), \quad (7)$$

где m_y — математическое ожидание предела текучести стали; 1,645 — квантиль Стьюдента для обеспеченности 95 %; S_y — среднеквадратическое отклонение предела текучести стали; v_y — коэффициент вариации предела текучести стали.

Для математической общности обозначим предел текучести стали как случайную величину \tilde{y} .

В табл. 2 приведены статистические параметры для стали С255, которые обеспечивают прочность по пределу текучести 255 МПа с вероятностью 95 % при различных коэффициентах вариации.

На рис. 1 представлены графики функций нормального распределения $F_{vy}(y)$ по статистическим параметрам табл. 2.

Пусть X — детерминированное значение напряжения в стальном элементе. Если прочность стали по пределу текучести описывается функциями распределения вероятностей, отмеченными выше, то вероятность безотказной работы может быть вычислена по известной формуле $P_s = \Phi\left(\frac{X - m_y}{S_y}\right)$,

где $\Phi(\cdot)$ — значение интегральной функции Лапласа. Вероятность отказа соответственно составляет $P_f = 1 - P_s$. Пусть $X = 242$ МПа. В табл. 3 приведены данные о показателях надежности.

Расчетные значения предела текучести стали получают путем деления нормативного значения на коэффициент надежности по материалу без учета коэффициента вариации. Можно сделать вывод, что даже при выполнении требований по обеспечению нормативной и расчетной прочности стали надежность строительного объекта в количественном выражении будет принимать различные значения вследствие различных коэффициентов вариации. Внедрение полных вероятностных расчетов позволит проводить проектирование строительных конструкций с более углубленным пониманием действительного уровня надежности строительного объекта.

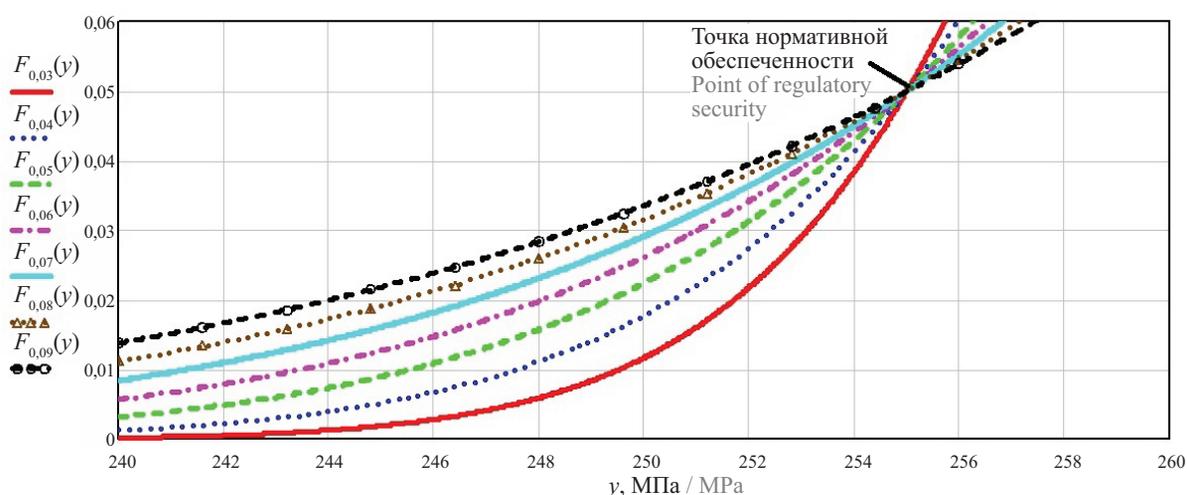


Рис. 1. Графики функций распределения вероятностей по данным табл. 2

Fig. 1. Graphs of cumulative distribution functions according to Table 2 data

Табл. 3. Предельные статистические параметры для стали С255

Table 3. Statistical limits for steel C255

v_y	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
P_f	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,014	0,017
β	3,26	2,84	2,58	2,41	2,29	2,20	2,13

В настоящее время моделирование методом Монте-Карло представляется универсальным методом, который может обеспечить решения с высокой точностью отдельных задач в стохастической механике, связанных с высокой нелинейностью, изменчивостью систем, большими вариациями неопределенных параметров и т.д., и который может оценить точность других приближенных методов.

Моделирование методом Монте-Карло по своей сути нуждается в генераторах случайных чисел. Доступные генераторы, как только выбрано одно и то же определенное начальное число, генерируют одну и ту же последовательность псевдослучайных чисел. Это приводит к кажущейся парадоксальной ситуации, в которой случайность кажется повторяемой и, следовательно, вполне детерминированной.

Поскольку для каждой реализации стохастической переменной, функции или поля приходится иметь дело с детерминированным вычислением, сразу становится ясно, что детерминированная механика является краеугольным камнем метода Монте-Карло. В итоге необходимо выбрать одну из конкурирующих детерминистических теорий, вполне очевидно, что для строгого стохастического расчета требуется отличное владение детерминистической механикой.

Как и любой аналитический инструмент, методы Монте-Карло могут давать неверные или недостоверные результаты всякий раз, когда вероятностные предположения ложны или не подтверждены

эмпирически. Разнообразные проблемы являются результатом двух основных видов ошибок:

- 1) использования точных распределений без эмпирического обоснования;
- 2) неправильного моделирования зависимостей между переменными.

Хотя очевидно, что неправильное использование точных распределений и допущений о независимости — это вина аналитика, а не анализа, также справедливо сказать, что анализ методом Монте-Карло, да и теория вероятностей в целом не имели бы большого практического применения без таких допущений.

Как правило, аналитики не должны делать неоправданных предположений только ради удобства вычислений. Оценка рисков не должна быть предварительным расчетом. Все, что известно эмпирически, должно быть изложено в явном виде и, насколько это возможно, не следует делать никаких дополнительных предположений для облегчения расчетов. Всякий раз, когда необходимы дополнительные допущения для решения неразрешимой в противном случае задачи, они должны быть четко сформулированы в описании подхода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим вероятностный анализ надежности стальной фермы «Молодечно» пролетом 18 м по серии 1.460.3-23.98. Стальные конструкции покрытий производственных зданий из замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения пролетом 18, 24 и 30 м с уклоном кровли 10 %. Информаци-

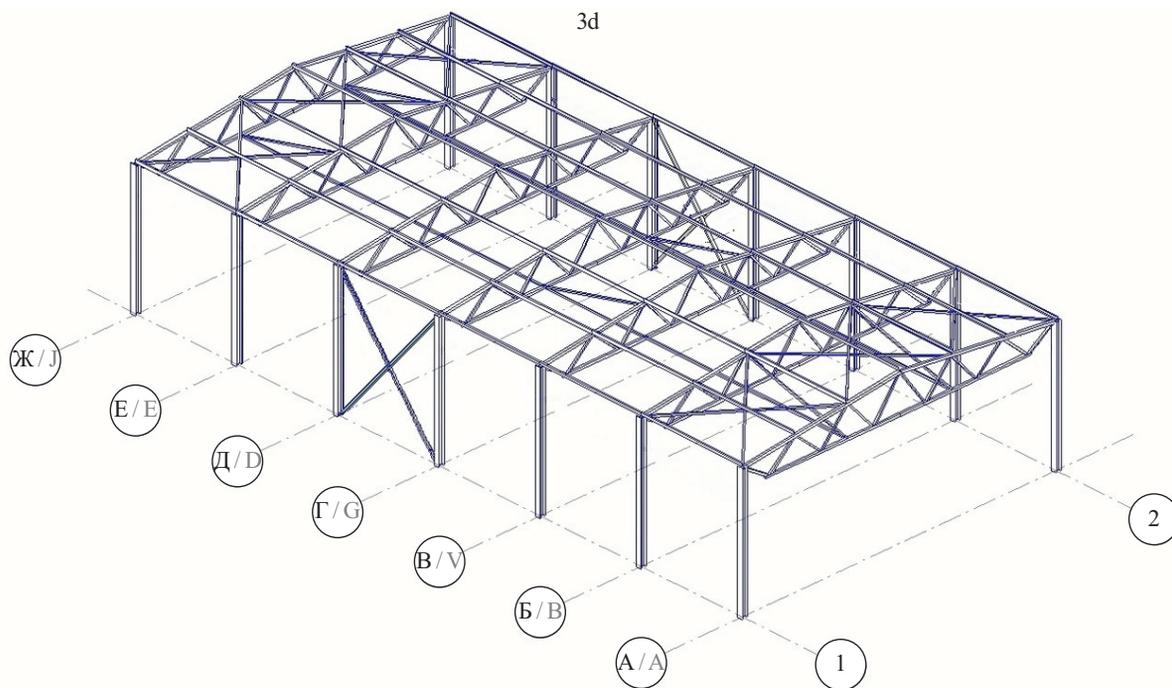


Рис. 2. Информационная модель стального каркаса в Tekla Structures

Fig. 2. Information model of the steel structure in Tekla Structures

онная модель стального каркаса с таким типом ферм показана на рис. 2.

Основной подход к численному моделированию случайных величин и последующему анализу надежности ферм как строительных конструкций основывается на генерации случайных чисел методами Монте-Карло. Для генерации случайных величин

по методу Монте-Карло и вероятностного анализа надежности необходима статистическая информация о случайных величинах (табл. 4). На рис. 3 показаны размеры поперечных сечений стержней фермы.

Если принять границы изменчивости плотности стали [7700; 7900] кг/м³, а изменения площади поперечного сечения стержней в границах, установ-

Табл. 4. Параметры случайных величин

Table 4. Parameters of random variables

Случайная величина Random variable	Распределение вероятностей Probability distribution	Параметры Parameters
Усилия в стержнях фермы от собственного веса Internal forces in the truss from self-weight	Постоянная (детерминированная) величина Constant (deterministic) value	По расчету в SCAD Office при максимальной плотности стали и площади сечения по допускам According to calculation in SCAD Office at maximum steel density and cross-sectional area by tolerances
Узловая нагрузка от веса конструкции покрытия Node load from the weight of the above structure	Нормальное Normal	$m_{p,1} = 535,5 \text{ кг / кг}; S_{p,1} = 27,18 \text{ кг / кг}; v_{p,1} = 0,05$
Узловая нагрузка от веса прогонов Node load from weight of binding rafters	Равномерное Uniform	$P_2 \in [187,31; 264,74] \text{ кг / кг}$
Нагрузка от веса снегового покрова Snow load	Гумбеля Gumbel	$\alpha = 86,9 \text{ г/м}^2 / \text{кг/м}^2; \beta = 28,5 \text{ г/м}^2 / \text{кг/м}^2$
Прочность стали по пределу текучести Yield strength of steel	Нормальное Normal	$m_y = 261,44 \text{ МПа / МПа}; S_y = 13,07 \text{ МПа / МПа}; v_y = 0,05$
Площади поперечных сечений стержней Cross-section area of the bars	Равномерное Uniform	В пределах допусков по ГОСТ 30245–2012 Within tolerances of GOST 30245–2012

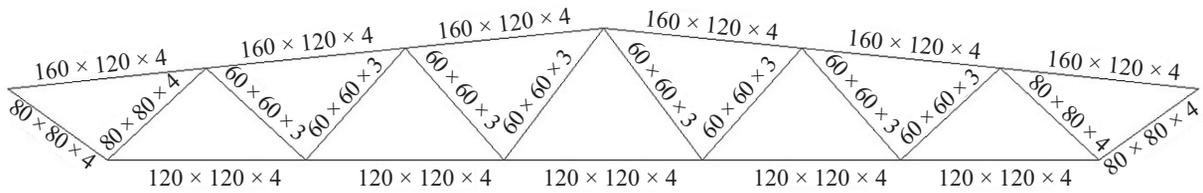


Рис. 3. Размеры поперечных сечений стержней фермы

Fig. 3. Dimensions of the cross sections of the truss bars

ленных ГОСТ 30245–2012 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций», то можно получить максимальный и минимальный допустимый вес погонного метра принятого профиля, а также вычислить максимальный и минимальный возможный вес фермы и соответствующие усилия в стержнях. На рис. 4, *a, b* показаны расчетные усилия в стержнях фермы от максимального и минимального возможного собственного веса соответственно. На рис. 4, *c* представлено процентное отношение изменения усилий от собственного веса к расчетным предельным усилиям по серии 1.460.3-23.98.

Изменения усилий в стержнях фермы от собственного веса будут составлять доли процента от расчетных предельных усилий. Для упрощения вероятностного анализа усилия в стержнях фермы от собственного веса будут приняты как постоянные

величины по верхней границе (в небольшой запас надежности).

Снеговая нагрузка — один из главных факторов, определяющих вероятность безотказной работы для многих стальных ферм. Известно [13, 14], что для вероятностного моделирования снеговой нагрузки хорошо подходит распределение Гумбеля (обобщенное распределение экстремальных значений I типа), которое зарекомендовало себя наилучшим образом для аппроксимации климатических параметров нагрузок в нашей стране и за рубежом. Исследование физико-механических свойств снега и снеговых нагрузок в России проводится уже более 120 лет. Характеристики снеговой нагрузки на грунт следует определять на основе наблюдений с метеостанций. Результатами таких наблюдений являются либо водные эквиваленты снега, либо глубина снежного покрова.

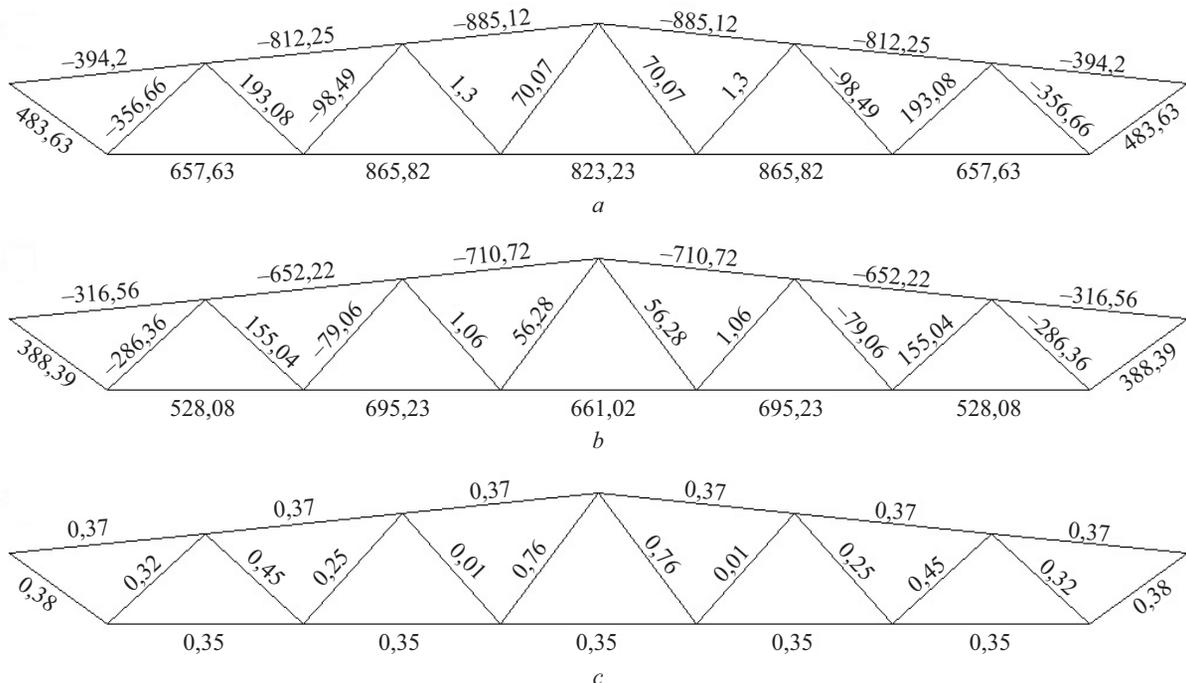


Рис. 4. Расчетные усилия в стержнях фермы от максимального собственного веса, кг (*a*); расчетные усилия в стержнях фермы от минимального собственного веса, кг (*b*); отношение разницы отклонений расчетных усилий от собственного веса к расчетным предельным усилиям, % (*c*)

Fig. 4. Calculated forces in the bars of the truss from the maximum self-weight, kg (*a*); calculated forces in the bars of the truss from the minimum self-weight, kg (*b*); ratio of the deviation of the calculated forces from the own weight to the calculated limit forces, % (*c*)

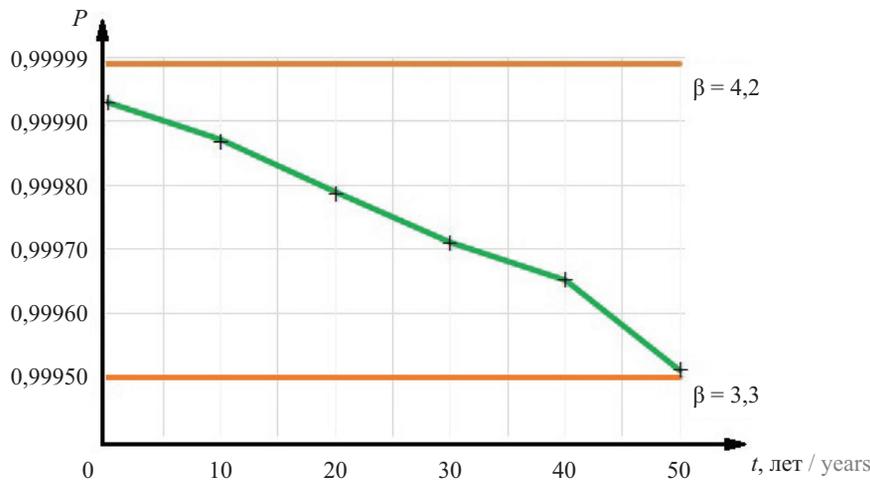


Рис. 7. Прогноз снижения уровня надежности стальной фермы

Fig. 7. The forecast of decrease in the reliability of the steel truss

Для более объективной оценки надежности предлагается наличие группы отказов в одной генерации считать за единый отказ, а общую надежность рассчитывать как отношение количества групп генераций без отказов к общему количеству групп генераций. В таком случае надежность фермы как системы составит $P_s = 0,99993$, что будет более объективной оценкой уровня безопасности. Более подробная информация приведена в работе [15].

Статистические данные для снеговой нагрузки по табл. 1 представлены для годового максимума. Если необходимо рассмотреть максимум за определенный период эксплуатации, то классическая формула распределения вероятностей Гумбеля сводится к виду:

$$F(s) = \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - s + \beta \ln n}{\beta} \right) \right], \quad (9)$$

где $\alpha = m_s - 0,45\sigma_s$; m_s — математическое ожидание годовых максимумов; $\beta = 0,78 \cdot \sigma_s$; σ_s — среднеквадратическое отклонение годовых максимумов; n — количество лет эксплуатации конструкционного элемента (количество моделируемых годовых максимумов).

Альтернативным вариантом служит коррекция допустимого индекса надежности на заданный срок эксплуатации. В Eurocode 0 отмечается, что когда основным случайным параметром являются воздействия, которые характеризуются годовыми статистическими независимыми максимумами (например, снеговая нагрузка), то для других периодов времени значение β может быть вычислено с помощью следующего выражения:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n, \quad (10)$$

где β_n — индекс надежности для периода в n лет; β_1 — индекс надежности для периода в один год.

В табл. 1 приведены целевые показатели надежности за годовой и 50-летний периоды. Для прогнозирования надежности стальных ферм необходима

информация об изменении статистических параметров случайных величин со временем эксплуатации строительных конструкций. В труде [16] исследован коэффициент вариации предела текучести стали новых и длительно эксплуатируемых строительных конструкций. Отмечается, что с течением времени коэффициент вариации предела текучести стали возрастает. Установив для прочностных свойств стали зависимость снижения математического ожидания прочности и роста коэффициента вариации с течением времени, можно прогнозировать изменение уровня надежности по представленной выше методике.

Существуют различные модели деградации прочностных свойств стали. Например, в работе [17] указывается линейное снижение среднего предельного напряжения стали и линейный рост среднеквадратического отклонения с течением времени. В публикации [18] представлен алгоритм оценки предельной прочности прямоугольных стальных листов, подвергшихся случайному локализованному коррозионному разрушению.

Пусть ожидаемое значение предела текучести стали снижается на 1 % каждые 10 лет эксплуатации, а коэффициент вариации возрастает в 1,2 раз каждые 10 лет. Повторив статистическую генерацию данных за отчетные периоды, можно проследить изменение уровня надежности фермы с течением времени (рис. 7).

Более подробная информация об учете фактора времени в расчетах надежности строительных конструкций приведена в исследованиях [19–22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полные вероятностные методы оценки уровня надежности строительных конструкций являются логичным этапом эволюции текущих подходов, которые называют полувероятностными или детерминистическими. Их использование позволит вы-

полнять технико-экономическое обоснование и оптимизацию проектных решений с учетом показателя уровня надежности.

Описан вероятностный подход к оценке надежности стержней стальной фермы отдельно и фермы в целом как системы. На примере показано, что применение классического подхода для анализа надежности последовательной системы в случае исследования надежности стальных ферм приводит к слишком консервативному результату вследствие независимого представления о работе ее элементов.

Наличие информации об изменении статистических показателей прочности стали со временем позволяет на основе описанной методики прогнозировать изменение уровня надежности с течением нормальной эксплуатации. Представленный подход даст возможность получить более экономичные технические решения, если имеются уточненные данные метеостанций по климатическим нагрузкам и статистические данные завода-производителя металлоконструкций, за счет углубленного подхода к анализу надежности строительных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Melchers R.E., Beck A.T. Structural reliability analysis and prediction. Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781-119266105
2. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : Издательство АСВ, 2016. 905 с. EDN ZCWYKL.
3. Dang C., Faes M.G.R., Valdebenito M.A., Wei P., Beer M. Partially Bayesian active learning cubature for structural reliability analysis with extremely small failure probabilities // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2024. Vol. 422. P. 116828. DOI: 10.1016/j.cma.2024.116828
4. Song C., Kawai R. Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis : a comprehensive review // Probabilistic Engineering Mechanics. 2023. Vol. 73. P. 103479. DOI: 10.1016/j.probenmech.2023.103479
5. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and invariant second-moment code format // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1974. Vol. 100. Issue 1. Pp. 111–121. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001848
6. Breitung K. Asymptotic approximations for multinormal integrals // Journal of Engineering Mechanics. 1984. Vol. 110. Issue 3. Pp. 357–366. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1984)110:3(357)
7. Xu J., Dang C. A new bivariate dimension reduction method for efficient structural reliability analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. Pp. 281–300. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.046
8. Xu J., Kong F. Adaptive scaled unscented transformation for highly efficient structural reliability analysis by maximum entropy method // Structural Safety. 2019. Vol. 76. Pp. 123–134. DOI: 10.1016/j.strusafe.2018.09.001
9. Li J., Chen J., Fan W. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability // Structural Safety. 2007. Vol. 29. Issue 2. Pp. 112–131. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.03.002
10. Li X., Chen G., Cui H., Yang D. Direct probability integral method for static and dynamic reliability analysis of structures with complicated performance functions // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2021. Vol. 374. P. 113583. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113583
11. Echard B., Gayton N., Lemaire M. AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation // Structural Safety. 2011. Vol. 33. Issue 2. Pp. 145–154. DOI: 10.1016/j.strusafe.2011.01.002
12. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Методы оценки надежности стальных ферм с использованием р-блоков. Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. 143 с. EDN YRCEMR.
13. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 25–33. EDN WIQRNX.
14. Hong H.P., Ye W. Analysis of extreme ground snow loads for Canada using snow depth records // Natural Hazards. 2014. Vol. 73. Issue 2. Pp. 355–371. DOI: 10.1007/s11069-014-1073-z
15. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Вероятностный анализ надежности ферм статистическим генерированием данных // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 5 (310). С. 2–11. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.5.2.11. EDN APKBGO.
16. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций // Безопасность техногенных и природных систем. 2023. Т. 7. № 3. С. 44–54. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54. EDN PJMKNJ.
17. Li S., Xu Y., Zhu S., Guan X., Bao Y. Probabilistic deterioration model of high-strength steel wires and its application to bridge cables // Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 9. Pp. 1240–1249. DOI: 10.1080/15732479.2014.948462
18. Silva J.E., Garbatov Y., Soares C.G. Ultimate strength assessment of rectangular steel plates subjected to a random localised corrosion degradation // Engineering Structures. 2013. Vol. 52. Pp. 295–305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.02.013
19. Meng D., Lv Z., Yang S., Wang H., Xie T., Wang Z. A time-varying mechanical structure reliabil-

ity analysis method based on performance degradation // *Structures*. 2021. Vol. 34. Pp. 3247–3256. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.085

20. Torres M.A., Ruiz S.E. Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time // *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29. Issue 9. Pp. 2183–2192. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.014

21. Wang L., Wang X., Wu D., Xu M., Qiu Z. Structural optimization oriented time-dependent reliabil-

ity methodology under static and dynamic uncertainties // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 57. Issue 4. Pp. 1533–1551. DOI: 10.1007/s00158-017-1824-z

22. Zhang J., Ma X., Zhao Y. A stress-strength time-varying correlation interference model for structural reliability analysis using copulas // *IEEE Transactions on Reliability*. 2017. Vol. 66. Issue 2. Pp. 351–365. DOI: 10.1109/tr.2017.2694459

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 11 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Александрович Соловьев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Олег Евгеньевич Копейкин — аспирант, ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1253938; koreykinoe@vogu35.ru;

Анастасия Андреевна Соловьева — аспирант, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1090512, Scopus: 57223210877, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaaa@vogu35.ru.

Вклад авторов:

Соловьев С.А. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Копейкин О.Е. — составление схем и рисунков, расчеты, итоговые выводы.

Соловьева А.А. — доработка текста, подбор литературы, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781119266105

2. Mkrtychev O.V., Rajzer V.D. *Reliability theory in structural design*. Moscow, ASV, 2016; 905. EDN ZCWYKL. (rus.).

3. Dang C., Faes M.G.R., Valdebenito M.A., Wei P., Beer M. Partially Bayesian active learning cubature for structural reliability analysis with extremely small failure probabilities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2024; 422:116828. DOI: 10.1016/j.cma.2024.116828

4. Song C., Kawai R. Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive review. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023; 73:103479. DOI: 10.1016/j.probenmech.2023.103479

5. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974; 100(1):111-121. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001848

6. Breitung K. Asymptotic approximations for multinormal integrals. *Journal of Engineering Mechanics*. 1984; 110(3):357-366. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1984)110:3(357)

7. Xu J., Dang C. A new bivariate dimension reduction method for efficient structural reliability analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019; 115:281-300. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.05.046

8. Xu J., Kong F. Adaptive scaled unscented transformation for highly efficient structural reliability analysis by maximum entropy method. *Structural Safety*. 2019; 76:123-134. DOI: 10.1016/j.strusafe.2018.09.001

9. Li J., Chen J., Fan W. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability. *Structural Safety*. 2007; 29(2):112-131. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.03.002

10. Li X., Chen G., Cui H., Yang D. Direct probability integral method for static and dynamic reliability analysis of structures with complicated performance functions. *Computer Methods in Applied Mechanics*

and Engineering. 2021; 374:113583. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113583

11. Echard B., Gayton N., Lemaire M. AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation. *Structural Safety*. 2011; 33(2):145-154. DOI: 10.1016/j.strusafe.2011.01.002

12. Solovev S.A., Soloveva A.A. *Structural reliability analysis methods for steel trusses based on p-boxes*. Vologda, Vologda State University, 2022; 143. EDN YRCEMR (rus.).

13. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Modeling of the Snow Load on the Roofs of Industrial Buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 8:25-33. EDN WIQRNX. (rus.).

14. Hong H.P., Ye W. Analysis of extreme ground snow loads for Canada using snow depth records. *Natural Hazards*. 2014; 73(2):355-371. DOI: 10.1007/s11069-014-1073-z

15. Soloveva A.A., Solovev S.A. Structural reliability analysis of steel trusses based on data sampling. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2023; 2(55):77-84. DOI: 10.54734/20722958_2023_2_77. EDN APKBGO. (rus.).

16. Vernezi N.L. Variation coefficient of metal yield strength in new and long-used building structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023; 7(3):44-54. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54. EDN PJMKNJ. (rus.).

17. Li S., Xu Y., Zhu S., Guan X., Bao Y. Probabilistic deterioration model of high-strength steel wires and its application to bridge cables. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2015; 11(9):1240-1249. DOI: 10.1080/15732479.2014.948462

18. Silva J.E., Garbatov Y., Soares C.G. Ultimate strength assessment of rectangular steel plates subjected to a random localised corrosion degradation. *Engineering Structures*. 2013; 52:295-305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.02.013

19. Meng D., Lv Z., Yang S., Wang H., Xie T., Wang Z. A time-varying mechanical structure reliability analysis method based on performance degradation. *Structures*. 2021; 34:3247-3256. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.085

20. Torres M.A., Ruiz S.E. Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time. *Engineering Structures*. 2007; 29(9):2183-2192. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.014

21. Wang L., Wang X., Wu D., Xu M., Qiu Z. Structural optimization oriented time-dependent reliability methodology under static and dynamic uncertainties. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57(4):1533-1551. DOI: 10.1007/s00158-017-1824-z

22. Zhang J., Ma X., Zhao Y. A stress-strength time-varying correlation interference model for structural reliability analysis using copulas. *IEEE Transactions on Reliability*. 2017; 66(2):351;365. DOI: 10.1109/tr.2017.2694459

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on March 6, 2025.

Approved for publication on March 11, 2025.

B I O N O T E S: **Sergey A. Solovyev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Civil Engineering Institute; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., 160000, Vologda, Russian Federation; ID RSCI: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Oleg E. Kopeykin — postgraduate student, assistant of the Department of Industrial and Civil Engineering, Civil Engineering Institute; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., 160000, Vologda, Russian Federation; ID RSCI: 1253938, nkovae@vogu35.ru;

Anastasia A. Solovyeva — postgraduate student, lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering, Civil Engineering Institute; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., 160000, Vologda, Russian Federation; ID RSCI: 1090512; Scopus: 57223210877, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaa@vogu35.ru.

Contribution of the authors:

Sergey A. Solovyev — scientific guidance, research concept, writing the original text, final conclusions.

Oleg E. Kopeykin — drawing up diagrams, calculations, final conclusions.

Anastasia A. Solovyeva — revision of the text, selection of literature, final conclusions.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04:624.012.45

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.667-682

Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки

Анатолий Викторович Алексейцев, Константин Валерьевич Юрусов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Определение несущей способности сжатых колонн при комбинированном воздействии (эксплуатационном статическом и поперечном динамическом нагружении), в том числе при аварийных нагрузках с учетом фактического состояния в условиях воздействия различных коррозионных и других средовых воздействий, является актуальной, недостаточно изученной проблемой. Ее решение требует разработки аналитических методов, трудоемких конечно-элементных моделей (КЭМ), рассмотрения и учета значительного количества параметров конструкции и среды.

Материалы и методы. Решение задачи получено аналитическим методом. Для оценки его корректности разработана КЭМ в объемной постановке, выполнено сравнение полученных аналитических результатов с экспериментальными данными других авторов.

Результаты. Разработана инженерная методика приближенной оценки несущей способности центрально сжатых поврежденных коррозией железобетонных колонн при поперечной импульсной нагрузке, вызванной аварийными ситуациями. Проведено сравнение результатов расчета с результатами конечно-элементного моделирования и известных натуральных экспериментов для конкретной схемы закрепления колонны. Предложена дискретно-временная модель учета коррозионных повреждений для объемных конечно-элементных схем, основанная на параболическом законе снижения механических характеристик бетона по глубине распространения коррозии.

Выводы. Установлено, что увеличение коррозионных повреждений бетона приводит к его хрупкому разрушению при аварийном воздействии, а увеличение глубины коррозионных повреждений при значительных сжимающих нагрузках ведет к местной потере устойчивости стержней арматуры в зоне действия поперечного импульса и существенному снижению сопротивляемости колонны прогрессирующему разрушению. Показана применимость предложенной инженерной методики к практическому использованию в интервале фактических эксплуатационных нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механическая безопасность, железобетонные колонны, центрально сжатые элементы, динамические нагрузки, ударное воздействие, поперечный удар, коррозионные повреждения

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за работу, направленную на улучшение качества статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алексейцев А.В., Юрусов К.В. Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 667–682. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.667-682

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Викторович Алексейцев, aalexw@mail.ru.

A study on the bearing capacity of compressed corrosion-affected reinforced concrete elements subjected to transverse impulse loading

Anatoly V. Alekseytsev, Konstantin V. Yurusov

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

ABSTRACT

Introduction. Finding the bearing capacity of compressed columns subjected to a combination of effects (normal static and transverse dynamic loading), including emergencies and taking into account the actual condition under various corrosion and other environmental effects, is a relevant though understudied problem. It requires analytical methods, labor-intensive finite element models, and a great number of parameters that should be taken into account.

Materials and methods. The solution was obtained analytically. The finite element model was developed in a 3D formulation to evaluate the applicability and convergence of results. Analytical results were compared with those obtained experimentally.

Results. An analytical technique was developed for the approximate evaluation of the bearing capacity of centrally compressed corrosion-affected reinforced concrete columns under transverse impulse loading in an emergency situation. The results obtained analytically were compared with the results of finite element modeling and well-known full-scale experiments that involved a specific column attachment pattern. A discrete-time model is proposed to take into account corrosion damage in 3D finite element schemes. This model is based on the parabolic law of mechanical characteristics of concrete that deteriorate along with the depth of corrosion propagation.

Conclusions. The authors found that a greater corrosion damage to concrete leads to its non-plastic destruction in the case of exposure to emergencies, and deeper corrosion damage under great compressive loading leads to the local loss of stability of reinforcement bars in the zone affected by transverse impulse loading and a great reduction in the column resistance to progressive collapse. The practical applicability of the proposed engineering method is proved for the range of relevant values of compressive loads.

KEYWORDS: mechanical safety, reinforced concrete columns, axially-loaded elements, dynamic loads, impact loading, transverse impact, corrosion damage

Acknowledgments. The authors thank the reviewers for their efforts focused on improving the quality of the article.

FOR CITATION: Alekseytsev A.V., Yurusov K.V. A study on the bearing capacity of compressed corrosion-affected reinforced concrete elements subjected to transverse impulse loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):667-682. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.667-682 (rus.).

Corresponding author: Anatoly V. Alekseytsev, aalexw@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование несущей способности и безопасности железобетонных конструкций при комбинированных воздействиях является актуальной научно-технической проблемой, обусловленной ухудшением механических характеристик материалов под воздействием неблагоприятных силовых и средовых факторов, а также возникновением аварийных ситуаций. Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций необходимо экспериментально-теоретическое обоснование прежде всего процессов коррозии. Этому посвящен ряд работ. Например, в публикации [1] рассматривалось моделирование коррозионно-повреждаемых плит при изменении рабочей площади арматуры и повреждениях бетона. Эти плиты впоследствии подвергались низкоскоростному удару. Также был поставлен верифицирующий эксперимент на основе ускоренной электрохимической коррозии под постоянным током. В исследовании [2] на балочных конструкциях изучается влияние сцепления арматуры с бетоном на несущую способность в случае коррозии арматурных стержней. Отмечается, что обеспечение анкеровки арматуры в бетоне служит одним из определяющих факторов в случае коррозионного повреждения железобетонных балок. Железобетонные плиты, подверженные коррозии, испытывались на многократные однотипные удары [3], при этом для повышения сопротивляемости плит использовалось углепластиковое усиление. Один из важных вопросов, исследуемых авторами, — надежность и долговечность конструкций с коррозионными повреждениями. Например, в труде [4] рассматривался аспект данной проблемы при циклически повторяющихся нагрузках, вызывающих усталостное разрушение. Установлено, что коррозия становится причиной ускорения и развития усталостных трещин, что особенно опасно для мостовых конструкций. Также на долговечность

поверженных коррозией балок влияет неравномерность коррозии арматуры [5]. При этом главный фактор — потеря сцепления бетона с арматурой, неравномерная деградация сцепления более опасна, чем равномерная. Изучение коррозии тесно связано с определением предельной несущей способности повреждаемых систем и усиления их несущей способности. Таким образом, возникает задача оптимального проектирования систем усиления. Такая задача решается в работе [6], где эффективность усиления исследуется для нескольких вариантов преднапряженных железобетонных рам. В ряде публикаций изучается моделирование распространения коррозии, в частности, по глубине железобетонной конструкции. При ускоренной коррозии, при постоянном токе сценарии распространения коррозии арматуры вглубь могут быть различными и случайными. Для этих целей используется теория распределения случайных величин и последовательностей случайных событий, например цепей Маркова [7].

Значительный интерес в исследованиях представляет область знаний, связанная с изучением железобетонных повреждаемых колонн при особых воздействиях, включая огневые [8] коррозионные повреждения, и различного типа поперечных ударных нагрузках. Примером таких конструкций могут быть пирсы, испытывающие циклические ударные нагрузки от волн [9]. При поперечных ударах и экспериментально, и теоретически исследуется множество различных аспектов, среди которых форма сечения (квадрат, круг) колонны, процент армирования, эксцентриситет приложения продольной силы и скорость удара [10–12] и др.

Процесс поперечного удара по коррозионно-повреждаемым колоннам очень сложен и зачастую требует разработки трудоемких конечно-элементных моделей (КЭМ). Однако на этапах предварительной проработки это нерационально, поэтому предлагаются упрощенные методики анализа [13],

но их основа базируется на подробном изучении механизмов сопротивления колонн поперечным ударным воздействиям [14].

Ряд исследований в области сопротивления удару железобетонных колонн с коррозионными повреждениями и без них посвящается разработке КЭМ. При этом часто используется объемная схема, а для моделирования низкоскоростного удара, характерного для нагружения этих конструкций, применяется метод прямого интегрирования. С такой целью эффективно применяется программный комплекс (ПК) LS-DYNA [15, 16], рассматривается аварийное столкновение конструкции и судна, а также введение композитных колонн для повышения их ударной прочности. Некоторые работы посвящены изучению бокового удара от тела, движущегося с ускорением. В частности, от свободнопадающих тел; объектом исследований в этих трудах являются процент армирования конструкций, масса индентора, время ударного воздействия [17, 18], где в качестве инструментов для численного исследования используются ПК Abaqus, Autodyn в составе Ansys Workbench. Изучается способность индентора передавать энергию удара на колонну. В соответствии с этим свойством удары могут быть мягкими и жесткими. Например, в работе [19] всесторонне проанализирован мягкий поперечный удар.

Значительная группа исследований поперечно-го удара на железобетонные колонны как с коррозионными повреждениями, так и без них посвящена экспериментам. В ходе таких исследований для выявления эффектов сопротивления удару и образования механизмов разрушения могут создаваться новые экспериментальные установки [20, 21]. Эти установки позволили установить характер разрушения железобетонной колонны при ударе автомобиля о конструкцию пирса. При этом разрушение происходило от сдвига по наклонной трещине. Кроме того, в указанных экспериментальных трудах изучены многие особенности распределения деформаций, изменение силы удара и бокового смещения. В экспериментальной работе [22] выявлен важный эффект — при высоких значениях сжатия скорости ударного воздействия механизм разрушения изменяется с изгибного на сдвиговый. В ряде экспериментальных публикаций рассматриваются композитные железобетонные колонны, усиленные карбоновой, стеклопластиковой, углепластиковой фиброй [23, 24]. Определено, что такой способ усиления существенно повышает сопротивляемость конструкций боковому удару низкой скорости, что соответствует аварийному воздействию от автомобиля.

В настоящей статье предлагается упрощенная инженерная методика оценки предельной несущей способности коррозионно-повреждаемых колонн при поперечном ударе. Она учитывает прямоугольную форму сечения колонны, наличие коррозионных повреждений бетона и арматуры, различные

способы закрепления колонны и ее гибкость. Удар предполагается мягким. Предпосылки формирования методики базируются на положениях [25, 26].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи и аналитическая модель

Будем исследовать НДС двух типов железобетонных колонн по гибкости: обычных и гибких. Каждый тип имеет одинаковое поперечное сечение, класс бетона и арматуры по прочности, а также схему армирования. Под гибкой колонной понимаем конструкцию, гибкость которой превышает величину $\lambda = 50$. Считаем, что колонны принадлежат к конструктивной схеме здания, являются торцевыми, но не являются крайними угловыми. При этом смежные пролеты здания считаются равными, т.е. колонна испытывает преимущественно сжатие и малый изгиб, обусловленный только случайным эксцентриситетом. Поперечное сечение принимается квадратным, армирование симметричным.

Несущая способность в теоретической модели оценивается на основе истинности конъюнкции условий прочности:

$$\left(N(t) \leq N_{ult}^{cur}(t) \right) \wedge \left(P(t) \leq P_{ult}^{cur}(t) \right), \quad (1)$$

где $N(t)$, $P(t)$ — фактически действующие продольная и поперечная нагрузки, воспринимаемые колонной с учетом времени t , в течение которого протекали процессы коррозионных повреждений; $N_{ult}^{cur}(t)$, $P_{ult}^{cur}(t)$ — предельные значения нагрузок, которые могут быть восприняты колонной без разрушения.

Эти усилия могут быть определены путем построения предельной кривой несущей способности (LCBC) вида:

$$N_{ult}^{cur}(t) = f(P_{ult}^{cur}(t)) = f(\varphi, R_b(t), A(t), R_{sc}(t), A_{s,tot}(t), z, \{C\}), \quad (2)$$

где φ — коэффициент продольного изгиба; $R_b(t)$, $R_{sc}(t)$ — расчетные сопротивления сжатию этих материалов с учетом наличия фактических коррозионных повреждений; $A(t)$, $A_{s,tot}(t)$ — площадь бетона и продольной арматуры соответственно; z — координата точки приложения импульса силы Pt_0 ; $\{C\}$ — варианты закрепления верхнего и нижнего узлов колонны.

Величины $R_b(t)$, $R_{sc}(t)$ могут быть определены экспериментально на основе ускоренной коррозии или на базе уже выполненных экспериментальных исследований путем корректировки начальных значений R_b , R_{sc} понижающими коэффициентами.

Известно, что при наличии хомутов или замкнутых сварных контуров поперечной арматуры в колонне прочность бетона повышается за счет ограничения деформаций бетона арматурой и вычисляется на основе модели Мандера [27]. Однако в работе [28] экспериментально и теоретически доказывается, что при наличии в сечении зоны

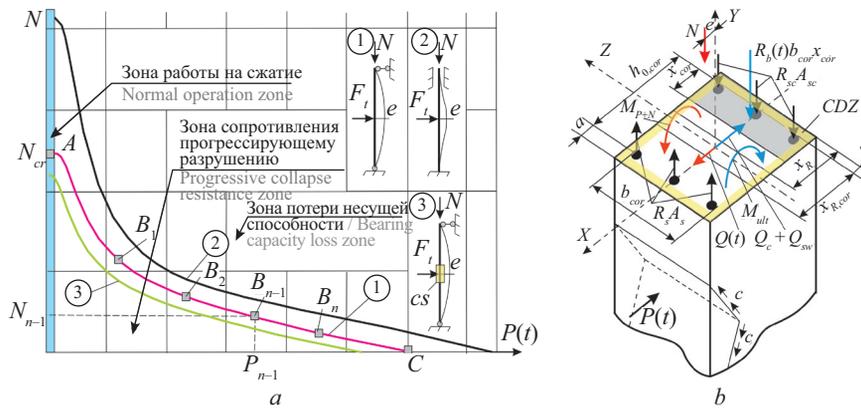


Рис. 1. Предполагаемый вид кривых несущей способности (LCBC) (а): 1–3 — схемы граничных условий и соответствующие им кривые; cs — зона коррозионных повреждений; A, B, C — точки, используемые для построения кривой; N_{n-1}, P_{n-1} — координаты точки B_{n-1} ; схема к определению уравнений равновесия при сжатии и поперечном ударе (б)

Fig. 1. Anticipated bearing capacity curves (а): 1–3 are diagrams of boundary conditions and corresponding curves; cs is the zone of corrosion damage; A, B, C are points used to make a curve; N_{n-1}, P_{n-1} are coordinates of point B_{n-1} ; the diagram used to make equilibrium equations for compression and a lateral impact (б)

растяжения бетона эффект ограниченного бетона значительно снижается. Поскольку при действии поперечного удара сечение работает по схеме внецентренного сжатия, то повышение прочности из-за стесненных условий деформирования бетона мы не учитываем. При численном моделировании эффект ограниченного бетона учитывается путем повышения напряжения когезии. Кроме этого, снижение прочности может корректироваться в расчете изменением модуля упругости для части материала. Кривая несущей способности строится по характерным точкам A, B, C (рис. 1).

Первая точка A для гибких колонн определяется как критическая сила, вызывающая потерю несущей способности, устанавливаемая по формуле Эйлера, а для колонн с гибкостью $\lambda \leq 50$ исходя из условия прочности по материалу. При этом начальная интенсивность удара $P_{t01} = 0$:

$$N_{cr,A}(\lambda) = \begin{cases} \frac{\pi^2 EJ_{red}}{l_0^2}, \lambda > 50 \\ \varphi [R_b(t)A(t) + R_{sc}(t)A_{s,tot}(t)], \lambda \leq 50 \end{cases}, \quad (3)$$

где l_0 — расчетная длина колонны, учитывающая вид опорных закреплений; φ — коэффициент продольного изгиба, зависящий от фактического значения EJ_{red} ; EJ_{red} — изгибная жесткость колонны, приведенная к бетону.

Третья точка C определяется при условиях, когда силы сжатия нет, а поперечный импульс $P(t)$, действующий в единицу времени, максимален. Это значение импульса для симметрично армированной колонны можно установить из уравнения равновесия для балки при отсутствии продольной силы. При этом используем выражение для симметрично армированного сечения, в котором изгибающий момент M в колонне от поперечной нагрузки равен предельному моменту M_{ult} , воспринимаемому сече-

нием. Пусть импульс приложен в точке $z = 0,5l$, константы множества $\{C\}$ соответствуют шарнирному закреплению обоих узлов стержня, тогда уравнение примет вид:

$$\frac{P_{ult}^{cur}(t)l}{4} = R_{sc}(t)A_s(t)(h_{0,cor} - a'); \quad (4)$$

$$h_{0,cor} = h_{cor} - a,$$

где $h_{0,cor}$ — высота сечения колонны при коррозионном повреждении; если поверхностный слой бетона не разрушается, то $h_{cor} = h$; a, a' — минимальные расстояния от растянутой (сжатой для a') грани сечения до центра тяжести растянутой (сжатой для a') арматуры. При разрушении слоя толщиной z , как показано на рис. 1, б, значение h_0 отсчитывается от внутренней границы слоя z .

При наличии построенной LCBC можно определить значение $P_{ult}^{cur}(t)$ для сечения с координатой $y = 0,5l$ в случае наличия там коррозионных повреждений. Если очаг коррозионных повреждений не совпадает с координатой y , для которой была построена кривая несущей способности, то значение усилия M , вычисляемое по формуле (4), в очаге коррозии нужно делить на коэффициент k_{sp} :

$$k_{sp} = (l - x_{sp})/l, \quad (5)$$

где x_{sp} — координата очага коррозии, отсчитываемая от опоры к середине пролета; l — геометрическая длина колонны.

Точки B_i определяются при значениях $N_i = N_{i-1} + \Delta$, начиная с точки $N_1 = \Delta$, для примера можно принять $\Delta = 100$ кН. В этом случае имеет место внецентренное сжатие, когда продольная сила N_1 действует с эксцентриситетом e_1 , вызванным прогибом f_{x1} от поперечной нагрузки P_1 и случайным эксцентриситетом e . Поперечная нагрузка приложена в точ-

ке $y = 0,5l$. Вычислим величину эксцентриситета при симметричном армировании колонны:

$$e_i = \eta_i \left(e + f_x + \frac{h_{0,cor} - a'}{2} \right), \quad (6)$$

где $\eta_i = 1/(1 - N_i/N_{cr,A})$, $f_x = P_1 l^3 / 48 E(t) J_{red}$, $e = \max(h_{cor}/30, 1/600, 0,01)$; η_i — коэффициент, учитывающий отклонения оси колонны в горизонтальном направлении от действия силы N_i ; f_x — максимальный горизонтальный прогиб от действия импульса силы P_1 ; J_{red} — осевой момент инерции сечения, приведенный к бетону; e — случайный эксцентриситет, м, определяемый в зависимости от длины колонны l и размера стороны ее сечения h .

Условие прочности нормального сечения из уравнения статического равновесия внутренних усилий (см. рис. 1, b и условия закрепления колонны (1) на рис. 1, a) запишем в следующей форме:

$$k_{sp} P_i / 4 + N_i e_i \leq [R_{cc}(t) b_{cor} x_{cor} (h_0 - 0,5x_{cor}) + R_{sc}(t) A_{sc}(t) (h_0 - a')], \quad (7)$$

где x_{cor} — высота сжатой зоны бетона в сечении. Ее величина устанавливается в зависимости от значения $\xi_{R,cor}$, определяемого для коррозионно-поврежденного элемента по формуле:

$$\xi_{R,cor} = \frac{0,9}{1 + R_s / E_s \varepsilon_{b2}}, \quad (8)$$

где E_s , ε_{b2} — модуль упругости арматуры и предельные пластические деформации в бетоне, полагаемые равными 0,0035, значение 0,9 определено из условия статического равновесия в сечении колонны с учетом смещения сжатой зоны бетона к центральной оси при коррозионном повреждении.

Итак, определяем значение x_{cor} :

$$x_{cor,i} = \begin{cases} \frac{N_i}{\varphi R_b(t) b_{cor}}, & 1 \geq \frac{x_{cor}}{h_{0,cor}} \geq \xi_{R,cor} \\ \frac{N_i}{R_b(t) b_{cor} - a}, & \frac{x_{cor}}{h_{0,cor}} < \xi_{R,cor} \end{cases}, \quad (9)$$

где φ — табулированная функция (СП 63.13330), представленная в табл. 1.

Для того чтобы определить, каким условием необходимо воспользоваться, следует предварительно вычислить x_{cor} по одной из формул (9). Подставляя вычисленное значение x_{cor} в (7), можно для значения N_1 получить величину P_1 , определяя точку B_1 на LCBC для $i = 1$ (рис. 1, a). Аналогично выполняются вычисления для других точек B_i .

Табл. 1. К определению коэффициента φ

Table 1. Finding coefficient φ

l_0/h	6	10	15	20
φ	0,92	0,9	0,8	0,6

Для выявления итогового значения импульсной нагрузки требуется полученное статическое значение разделить на коэффициент динамичности. Расчеты показывают, что этот коэффициент находится в пределах 1,05–1,30.

Численная модель оценки напряженно-деформированного состояния

Моделирование нагрузок

Нагрузки $F(t)$ в динамическом расчете будем определять произведением константы P на функцию изменения единичной нагрузки во времени $\bar{P}(t)$:

$$F(t) = P \bar{P}(t). \quad (10)$$

В динамической постановке те нагрузки, для которых не задается закон изменения во времени, считаются внезапно приложенными. Характер горизонтальных перемещений колонны зависит от формы импульса, что представлено на рис. 2, a, b . Вертикальные нагрузки имеют вид функций N , приведенных на рис. 2, c, d . Действие поперечной импульсной нагрузки моделируется функцией, показанной на рис. 2, c, d красным цветом.

На рис. 2 обозначено: $X_{d,max}$ — максимальное динамическое перемещение; X_d — установившееся перемещение на интервале $[t_2; t_3]$; X_{ds} — значение перемещения после действия импульса; X_s — значение перемещения при динамической релаксации после приложения вертикальной нагрузки; $[0; t_0]$ — интервал приложения вертикальной нагрузки; $[t_0; t_1]$ — интервал затухания колебаний после приложения этой нагрузки; $[t_2; t_3]$ на рис. 2, c — интервал приложения импульса; $[0; t_4]$ — общее время рассматриваемого динамического переходного процесса.

В условиях относительно малого времени приложения импульсной нагрузки и при массе индентора, значительно меньшей по сравнению с массой колонны, инерционные свойства индентора можно описать так. Масса индентора m действует на колонну с конечной скоростью \vec{V} , передавая ей импульс тела $m\vec{V}$. Этот импульс равен импульсу внезапно приложенной эквивалентной статической силы $2\vec{H}\Delta t$, $\Delta t = 1$ с. При этом, если фактическое время действия нагрузки составляет t , то статический эквивалент силы, используемый в расчете, приводя векторы к скалярам для горизонтальной нагрузки, можно вычислить по формуле:

$$P = H_x = 0,5mV_x t. \quad (11)$$

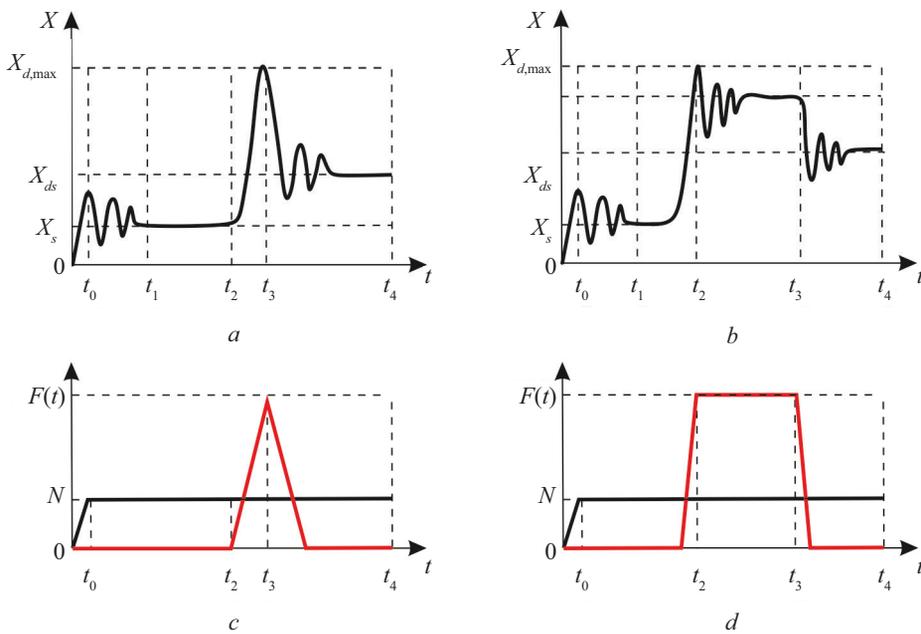


Рис. 2. Ожидаемые графики перемещений сжатой колонны под действием горизонтального импульса силы во времени (a, b); графики изменения горизонтальной и вертикальной нагрузки во времени (c, d)

Fig. 2. Anticipated graphs of displacement of a compressed column under a horizontal impulse of force over time (a, b); graphs of changes in horizontal and vertical loads over time (c, d)

Уравнение динамики, материалы и кинематические ограничения

Для железобетонной колонны система уравнений метода конечных элементов при поперечном ударе может быть записана в виде:

$$[M(\{Z\})]\{\ddot{Z}\} + [C(\{Z\})]\{\dot{Z}\} + [[K_c(\{Z\})] + [K_r(\{Z\})]]\{Z\} = \{F(t)\} + \{G\}\chi(t) + \{H(t)\}, \quad (12)$$

где $[M(\{Z\})]$, $[C(\{Z\})]$ — матрицы масс и демпфирования; $\{Z\}$, $\{\dot{Z}\}$, $\{\ddot{Z}\}$ — узловые перемещения, скорости, ускорения; $[K_c(\{Z\})]$, $[K_r(\{Z\})]$ — матрицы жесткости бетона и арматуры соответственно; $\{F(t)\}$, $\{H(t)\}$ — векторы вертикальных и горизонтальных нагрузок; $\{G\}\chi(t)$ — произведение сил тяжести на функцию Хевисайда.

Матрица демпфирования здесь определяется по схеме Рейля, при которой учитывается только конструкционное демпфирование коэффициентом β . Точно установить этот коэффициент можно экспериментальным путем, однако для железобетонной конструкции в состоянии, близком к предельному, задача существенно усложняется. Трудность связана с образованием, ростом и раскрытием трещин в процессе колебаний. Для неразрушенных рамных конструкций начальное значение коэффициента β принимается равным 0,05, но экспериментальные исследования показывают, что из-за несовершенств узловых соединений и прочих факторов этот коэффициент можно принимать равным до 0,1. В расчетах принимаем во внимание диаграмму бетона, учитывающую стеснение поперечного деформирования в соответствии с моделью Мандера, модифи-

цированной для случая внецентренного сжатия [28]. Первоначально для квадратного сечения вычисляем сопротивление бетона при стесненной работе:

$$R_b = R_{b0} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{\sigma_l}{R_{b0}} - 2 \frac{\sigma_l}{R_{b0}}} \right); \quad (13)$$

$$\sigma_l = k_e \frac{2R_s^w A_{sw}}{sd}; k_e = \frac{A_e}{A} = \frac{1}{\mu} \left(1 - \frac{s - \phi_w}{2d} \right),$$

где R_{b0} — прочность бетона на сжатие; σ_l — эквивалентное поперечное давление; R_s^w — предел текучести поперечной арматуры; A_{sw} — площадь поперечной арматуры; s — шаг хомутов; d — ширина хомута, принятая по оси арматуры; k_e — коэффициент, определяемый отношением площади бетона, работающей в условиях стесненного сжатия к полной площади сечения; μ — коэффициент продольного армирования сечения; ϕ_w — диаметр поперечной арматуры.

После этого выполняем коррекцию напряжения когезии C (рис. 1, b) для модели бетона путем его увеличения на коэффициент, равный отношению R_b/R_{b0} . При моделировании используем подход, когда арматура задается элементами типа beam, а бетон — объемными гексаэдрами. При этом возможно соединение бетона и арматуры на основе контакта трения, rigid или gar элементами. Расчеты показали, что в данной задаче фактическая податливость соединения арматуры и бетона существенно не влияет на результаты моделирования, поэтому авторами принято жесткое соединение. Продольная арматура

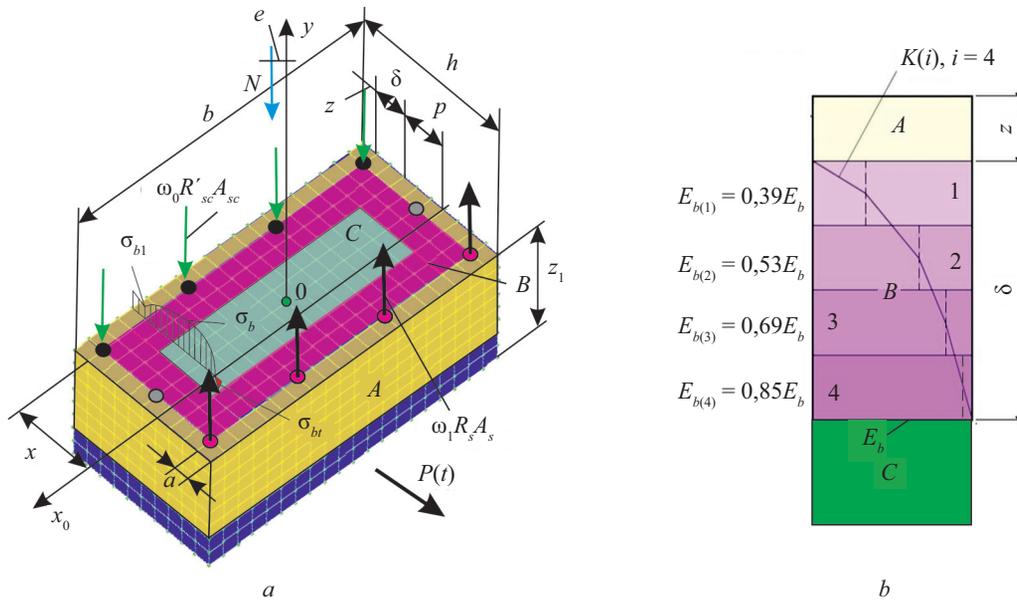


Рис. 3. Учет коррозионных повреждений при численном моделировании

Fig. 3. Using numerical methods to simulate corrosion damage

и поперечные хомуты деформируются в соответствии с диаграммой Прандтля. Образование и развитие трещин для неповрежденного коррозией бетона учитывается путем уменьшения модуля упругости бетона. Для зоны сжатия с изгибом принимается снижение модуля упругости бетона до 0,1 от начального значения.

Модель повреждения от коррозии и ее реализация для численных методов

Рассмотрим коррозию в виде очага размером z_1 по высоте колонны. В наиболее опасном случае вся колонна в пределах этой высоты находится в неблагоприятной среде. При моделировании коррозии бетона учитываем послойную деградацию механических характеристик. Слой A на рис. 3 считается наиболее поврежденным, его модуль упругости составляет не более 8 % от начального. Прочность в нем также существенно снижается. В слое B идут переходные процессы, связанные с развитием коррозии вглубь бетона, при этом изменение модуля упругости по толщине слоя будем представлять в виде параболической функции $K(i)$. Здесь i — число слоев, на которые разбивается слой B . В соответствии с обозначениями рис. 3, a и работы [29] запишем:

$$E_{b(z)} = 0,08E_b;$$

$$E_{b(z+i)} = E_{b(z)} + \Delta E_b K(i); \quad E_{b(z+\delta)} = E_b; \quad (14)$$

$$K(i) = 1 + z_{Bi}/\delta + z_{Bi}^2/\delta^2,$$

где z_{Bi} — координаты i -го слоя в слое B .

Пример расчета значений модулей упругости в слое B при $i = 4$ показан на рис. 3, b .

В результате электрохимической коррозии сталь арматурных стержней размягчается, кроме

этого, в результате электролитической диссоциации площадь продольной рабочей арматуры уменьшается. Это уменьшение можно учесть для отдельного состояния коррозии в какой-то момент времени коэффициентами w_0, w_1 (см. рис. 3, a). Значения этих коэффициентов зависят от времени продолжения коррозионных процессов и могут приниматься по результатам экспериментальных исследований равными 0,75–0,95. При сжатии с изгибом в очаге коррозии положение нейтральной оси определяется величиной p таким образом, что размер сжатой зоны бетона $x = \delta + p$, т.е. поврежденный слой бетона, при расчете значения x не учитывается. Это приводит к тому, что сжатая зона бетона смещается ближе к центральной горизонтальной оси инерции, а несущая способность сечения снижается. Определение напряжений $\sigma_b, \sigma_{b1}, \sigma_{bt}$ в виде аналитической зависимости весьма громоздко, поэтому для оценки несущей способности, в частности значения x , будем использовать упрощение, описанное в виде формулы (9) и состоящее в том, что разрушение от действия сжимающей силы и поперечной импульсной нагрузки будет связано с разрушением бетона от сжатия и от нарушения когезии по наклонным сечениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пример построения LCBC для железобетонной колонны без коррозионных повреждений и при их наличии

В качестве примера, показывающего работоспособность предлагаемой инженерной методики, выполним оценку несущей способности колонны высотой 4 м, сечением $0,4 \times 0,4$ м, которая испытывает сжатие силой 1000 кН. Механические харак-

Табл. 2. Исходные данные и показатели, используемые в расчетах

Table 2. Initial data and characteristics used in calculations

Наименование / Type of values	Значение / Value		Коэффициент снижения / Reduction factor
	При стандартных условиях / Under standard conditions	С учетом коррозионных повреждений / Taking into account corrosion damage	
Начальный модуль упругости бетона / Initial modulus of elasticity of concrete	27,5 ГПа / GPa	16,5 ГПа / GPa	0,6
Модуль упругости с учетом образования трещин / Modulus of elasticity taking into account cracking	0,275 ГПа / GPa	0,165 ГПа / GPa	0,6
Модуль упругости арматуры / Modulus of elasticity of reinforcement	200 ГПа / GPa	180 ГПа / GPa	0,9
Расчетное сопротивление арматуры / Design reinforcement strength	435 МПа / MPa	391,5 МПа / MPa	0,9
Расчетное сопротивление бетона / Design concrete strength	11,5 МПа / MPa	9,2 МПа / MPa	0,8
Коэффициент расчетной длины / Effective length factor	0,7	0,7	–
Рабочая высота сечения h_0 / Effective section depth h_0	0,35 м / m	0,325 м / m	0,89(3)
Площадь растянутой и сжатой продольной арматуры / Area of tensile and compressed longitudinal reinforcement	12,32 см ² / cm ²	11,088 см ² / cm ²	0,9
Расстояние до центра тяжести арматуры a (рис. 1) / Distance to center of gravity of reinforcement a (Fig. 1)	5 см / cm	5 см / cm	–
Размеры зон z и δ (рис. 3) / Sizes of zones z and δ (Fig. 3)	–	5 см / cm; 10 см / cm	–
Напряжение когезии / Cohesion	3,3 МПа / MPa	1,32 МПа для зоны А / 1.32 MPa for zone A; 2,31 МПа для зоны В / 2.31 MPa for zone B	0,36 / 0,7

теристики неповрежденных материалов колонны и имеющих коррозионные повреждения показаны в табл. 2. Здесь же приведены и другие параметры для аналитического и численного моделирования НДС колонны.

На колонну в середине пролета действует импульс механической силы, равный 120 кН·с, приложенный по схеме рис. 2, *d*. Схема закрепления колонны соответствует ограничениям вида (2), показанным на рис. 1, *a*, где нижний опорный узел имеет жесткое закрепление, а верхний шарнирно неподвижен. Армирование колонны симметричное, продольная арматура 4*d*28 расположена по углам сечения, поперечная — хомуты *d*10 с шагом 0,25 м по высоте колонны. Колонна имеет очаг коррозионного повреждения в середине пролета высотой $y_1 = 0,5$ м с повреждениями бетона и арматуры по периметру колонны, как показано на рис. 3, *a*. Очаг коррозии находится в середине высоты колонны. Первоначально строится LCBC для системы

без коррозионных повреждений. Вычисляются геометрические характеристики приведенного к бетону сечения колонны — площадь сечения:

$$A_{red} = hb + E_s/E_b(A_{sc} + A_s) = 0,4 \cdot 0,4 + 200/27,5 \times (12,23 + 12,23) \cdot 10^{-4} = 0,1754 \text{ м}^2; \text{ момент инерции: } J_{red} = bh^3/12 + 2 E_s/E_b \cdot A_s(h_0 - a/2)^2 = 0,4 \cdot 0,4^3/12 + 2 \times 200/14,5 \cdot 12,32 \cdot 10^{-4} \times 0,325 \cdot 0,5 = 0,002682 \text{ м}^4.$$

$$\text{Гибкость колонны: } \lambda = \mu l / \sqrt{J_{red} / A_{red}} = 0,7 \times 4 / \sqrt{0,002682 / 0,1754} = 22,64 < 50.$$

Для построения точки *A* используется второе уравнение из системы (3): $P = 0, N_{cr,A}(\lambda) = \varphi(R_b A + R_{sc} A_{s,tot}) = 0,91(11,5 \cdot 0,16 \cdot 10^3 + 435 \cdot 2 \cdot 12,32/10) = 2,649$ кН.

Точка *C* (см. рис. 1, *a*) строится из условия ($N = 0$) \wedge ($P \rightarrow \max$). Для заданной схемы закрепления при действии силы *P* в середине пролета максимальный изгибающий момент будет в заделке. Он равен $M_{max} = 3Pl/16$, с другой стороны для симметрично

армированной колонны с учетом некоторого запаса прочности предельный момент определяется правой частью уравнения (4), тогда: $P_{ult}^{cur} = 16R_{s,A_s}(h_0 - a)/3l = 16 \cdot 435 \cdot 12,32/10 \cdot (0,35 - 0,05)/12 = 214,36$ кН.

Теперь построим точки B_i . Анализируя выражение (9), можно увидеть, что эти точки будут образовывать две кривые, вычисляемые в зависимости от ξ_R . Если коррозионные повреждения отсутствуют, то вместо 0,9 в формуле (8) будем использовать значение 0,8. Тогда $\xi_R = 0,8(1 + R_s/E_s \varepsilon_{s2}) = 0,4933$.

Рассмотрим вычисление значений для одной из точек LCBC при $\xi < \xi_R$ и для одной из точек при $\xi \geq \xi_R$. Принимаем $N_1 = 500$ кН. По формуле (9) проверяем: $x_0 = N/R_b(b - a) = 500/(11,5 \cdot (0,4 - 0,05) \cdot 1000) = 0,1242$ м, $\xi = 0,1242/0,35 = 0,3548 < \xi_R$.

Условие выполнено, в уравнении (7) будем использовать $x_{cor} = x_0$.

Вычисляем случайный эксцентриситет: $e = \max \times (h/30, l/600, 0,01) = \max(0,01(3), 0,00(6), 0,01) = 0,01(3)$ м.

Горизонтальный прогиб колонны определим с помощью метода Симпсона, опуская выкладки, получим: $f_x = P_1 l^3 / (192 E_b J_{red}) = P_1 \cdot 4^3 / (192 \cdot 27,5 \times 10^3 \cdot 0,002682) = P_1 \cdot 0,004519$ м.

$$P_1 = \frac{[11,5 \cdot 0,4 \cdot 0,1242(0,35 - 0,5 \cdot 0,1242) + 435 \cdot 12,32 \cdot 0,1 \cdot (0,35 - 0,05)] - 500 \cdot 0,2013}{3 \cdot 4/16 + 0,00557 \cdot 500} = 295,8 \text{ кН.}$$

Теперь рассмотрим случай при $\xi \geq \xi_R$. Принимаем $N_1 = 1000$ кН. По формуле (9) проверяем $x_0 = N/R_b(b - a) = 1000/(11,5(0,4 - 0,05)1000) = 0,2448$ м, откуда величина $\xi_0 = 0,2448/0,35 = 0,6994 > \xi_R$. В этом случае расчет ведем по первому уравнению формулы (9): $x = N_2 / (\varphi R_b b) = 1000 / (0,91 \cdot 11,5 \cdot 0,4 \times 1000) = 0,2388$, $\xi = 0,682 > \xi_R$.

Вычисляем значения переменных аналогично последовательности действий, описанной выше: $f_x = P_2 \cdot 0,009038$, $\eta_2 = 1,6064$, $e_2 = 0,2623 + 0,01451P_2$, $P_2 = 204,55$ кН.

Таким образом, для указанных диапазонов значений ξ может быть построена кривая LCBC как с учетом коррозионных повреждений, так и без них. Результаты этого построения приведены на рис. 4.

Как видно на рис. 4, при $\xi \geq \xi_R$ результаты расчета по аналитической модели хорошо согласуются с результатами численного анализа в объемной постановке. На кривой показаны точки, полученные расчетом. Хвостовая часть функции в аналитической модели значительно отличается от кривой 1, но это вполне допустимо, поскольку минимальные значения продольных сил для такой колонны в условиях ее реальной эксплуатации не могут быть ниже 500 кН из-за наличия собственного веса конструкций. На участке $\xi \geq \xi_R$ аналитический расчет допускает значительный запас прочности по сравнению с конечно-элементным анализом, что также является допустимым.

Коэффициент, учитывающий влияние продольной силы на прогиб, составляет:

$$\eta_1 = 1/(1 - N_1/N_{cr,A}) = 1/(1 - 500/2649) = 1,2326, \text{ тогда эксцентриситет: } e_1 = \eta_1(e + f_x + 0,5(h_0 - a')) = 1,2326(0,01(3) + 0,004519P_1 + 0,5(0,35 - 0,05)) = 0,2013 + 0,00557P_1.$$

Запишем условие прочности (7) применительно к рассматриваемому случаю опорных закреплений, при этом $k_{sp} = 1$, так как в данном случае повреждения от коррозии не учитываются. Тогда: $3P_1 l/16 + N_1 e_1 = [R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{sc} (h_0 - a')]$, подставляя в эту формулу выражение для e_1 , получим $3P_1 l/16 + N_1(0,2013 + 0,00557P_1) = [R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{sc} (h_0 - a')]$,

$$P_1 = \frac{[R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{sc} (h_0 - a')] - N_1 0,2013}{3l/16 + 0,00557N_1}.$$

Подставляя в это выражение значение $N_1 = 500$ кН и ранее вычисленные величины, связанные с этим значением, получаем предельное значение статической поперечной нагрузки, при которой несущая способность колонны будет обеспечена. Получим:

Для рассматриваемой конструкции при $N = 1000$ кН выполнялся расчет в динамической постановке со значением горизонтального импульса 204,55 кН·с по форме (рис. 2, d). В результате произошло разрушение конструкции. Далее последовательно значение импульса уменьшалось. Конструкция сохранила несущую способность при $P_{ult} = 185$ кН·с. Коэффициент динамики kd при этом составил 1,1.

Выполним теперь расчеты с наличием очага коррозионных повреждений, уменьшая характеристики модели, как показано в табл. 2, моделирование коррозионных повреждений в соответствии с рис. 3. Результаты построения кривых, иллюстрирующих адекватность аналитической модели, представлены на рис. 5. После построения LCBC можно осуществить проверку условия (1) путем определения попадания точки с квазистатическими усилиями N, P под кривую несущей способности с учетом коррозионных повреждений. Итак, $P = F(t)kd = 120 \cdot 1,1 = 132$ кН, а продольная сила составляет $N = 1000$ кН.

По рис. 5 можно определить, что при заданных условиях нагружения импульсной поперечной нагрузкой для колонны при отсутствии повреждений от коррозии будет обеспечиваться несущая способность. При наличии коррозионных повреждений конечно-элементный анализ и инженерная методика прогнозируют разрушение (точка T лежит над кривыми 3 и 4, фактически это проверка условия (1)). При рассматриваемом уровне коррозионных по-

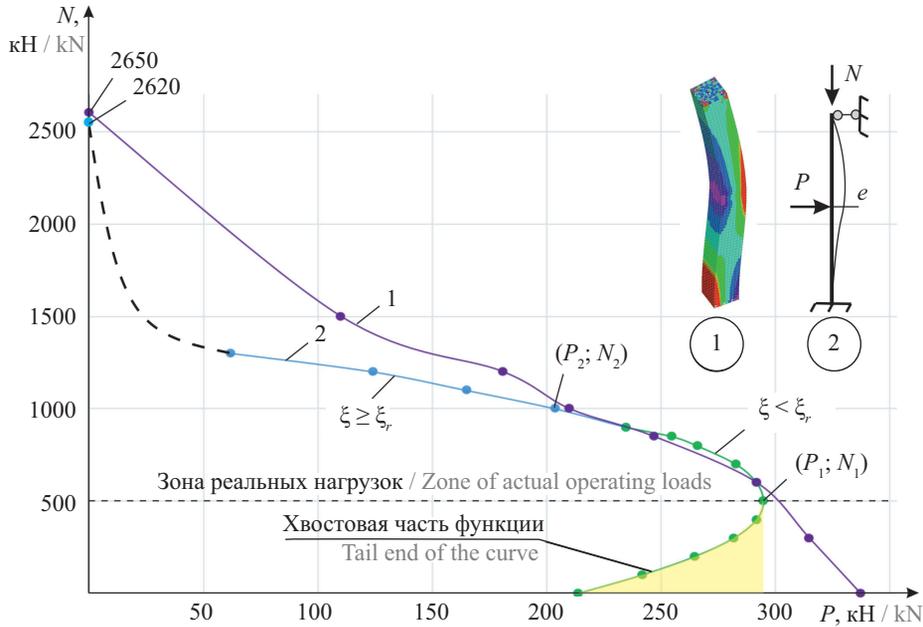


Рис. 4. Результаты построения LCBC для системы без коррозионных повреждений (1) и ее сравнение с результатами численного моделирования в объемной постановке (2)

Fig. 4. LCBC plotting results for a system without corrosion damage (1) and its comparison with results of numerical modeling in a 3D formulation

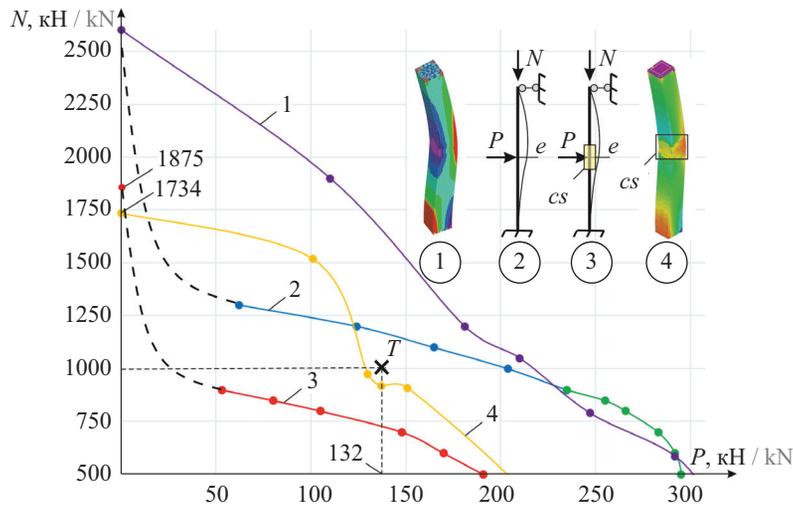


Рис. 5. LCBC для различных случаев и методик расчета: T — точка, в которой проверяется несущая способность колонны; cs — место очага коррозии

Fig. 5. LCBC for various cases and calculation methods: T is the point where the load-bearing capacity of a column is tested; cs is the corrosion spot

вреждений несущая способность гарантировано может быть обеспечена только при уровне поперечной нагрузки 25 кН, что соответствует поперечному импульсу 22,7 кН·с.

Численный анализ НДС для коррозионно-поврежденных колонн квадратного сечения.

Сравнение результатов расчета и экспериментов

Экспериментальные данные и условия проведения эксперимента для верификации, построенной LCBC, взяты из работы [30]. В этом исследовании

рассматривается образец колонны длиной 1,5 м. Армирование симметричное, продольная арматура в виде четырех стержней $d12$ в угловых зонах сечения с расчетным сопротивлением $R_s = 440$ МПа. Поперечная арматура подобрана таким образом, чтобы прочность по наклонным сечениям у опор колонны при действии горизонтального импульса была обеспечена. Коррозионные повреждения в этих испытаниях отсутствуют. Характеристики испытываемых образцов приведены в табл. 3.

Табл. 3. Данные экспериментальных образцов

Table 3. Experimental data

Марка образца Specimen grade	Размеры сечения, м Section dimensions, m	Высота сечения h_0 , м Section depth h_0 , m	Z_0 , м Z_0 , m	R_b , МПа R_b , MPa	N , кН / kN	P , кН / kN D/S
B12-D	0,240 × 0,150	0,214	0,180	30,6	0	114/98
K12-D-1	0,245 × 0,150	0,200	0,170	27,7	120	180/146
K12-D-2	0,246 × 0,156	0,212	0,190	27,7	240	246/178
K12-D-3	0,240 × 0,155	0,220	0,195	28,2	480	274/200

Примечание: Z_0 — это расстояние между центрами тяжести рабочей арматуры; D/S — идентификатор типа испытаний: D — динамические испытания; S — статические испытания.

Note: Z_0 is the distance between the centers of gravity of the working armature; D/S is the test type identifier: D is dynamic testing; S is static testing.

Для проверки адекватности предлагаемой методики инженерного расчета экспериментальным исследованиям будем выполнять построение LCBC без коррозионного повреждения. При этом учитывается схема приложения нагрузки в экспериментальной установке, для которой момент чистого изгиба равен $PA/2$, где $A = 0,5$ м — расстояние от динамометрической опоры до двухточечной нагрузочной траверсы. Для вычисления значения сжатой зоны x в формуле (9) при отсутствии повреждений от коррозии $b_{cor} = b$, величина a не учитывалась, а вместо множителя $1/\varphi$ продольная сила умножалась на коэффициент η . Результаты сравнения методики расчета и эксперимента показаны на рис. 6.

Анализируя LCBC, полученные на основе различных подходов к расчету НДС, можно отметить, что существует площадь (например, между кривыми 3 и 4), попадание в которую нагрузки может при-

водить к различным прогнозам. А именно для точки $P = 75$ кН; $N = 1000$ кН конечно-элементный анализ дает положительный прогноз по обеспечению несущей способности, а инженерная методика предсказывает разрушение. Это вполне ожидаемый результат, так как при конечно-элементном моделировании учитывается пластическая работа арматуры и пластический характер разрушения бетона. В инженерной методике эти явления упрощены, фиксируется лишь уровень напряжений в бетоне и арматуре. Тем не менее для приближенных прогнозов оценки несущей способности предлагаемая инженерная методика вполне может быть применима, поскольку при аварийной ситуации инженерная методика гарантирует некоторый запас прочности.

В случае, когда прогнозы об обеспечении несущей способности, полученные по различным методикам, отличаются, единственным способом,

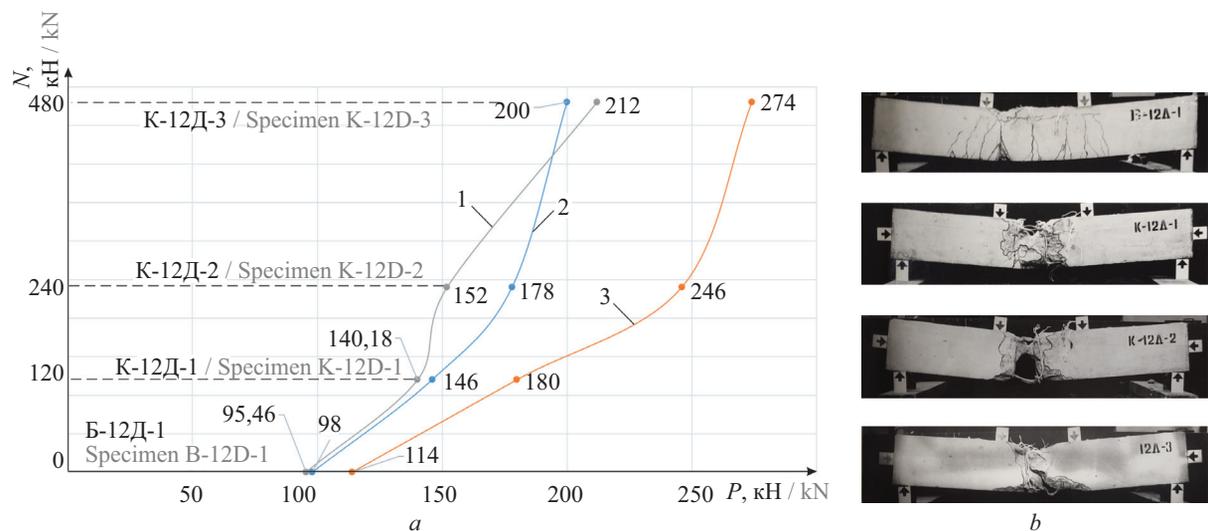


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: LCBC, полученные в расчетах и эксперименте (a); 1 — аналитический расчет; 2 — эксперимент со статическим нагружением; 3 — эксперимент с динамическим нагружением; фото экспериментальных образцов [30] со схемой разрушения при динамических испытаниях (b)

Fig. 6. Comparison of experimental and calculated data: LCBC obtained in calculations and an experiment (a); 1 is the analytical calculation; 2 is the static loading experiment; 3 is the dynamic loading experiment; photos of experimental specimens [30] with a diagram of destruction during dynamic tests (b)

позволяющим установить истинность прогноза, является натурный эксперимент. Однако его проведение представляется сложным, так как, кроме геометрии масштабной модели, каким-то образом необходимо получить значения механических характеристик и воспроизвести уровень коррозионных повреждений. Поэтому в данной статье выполнялось сравнение инженерной методики с фактически проведенным экспериментом без учета коррозии.

Перспективы дальнейших исследований, посвященных рассматриваемой тематике, лежат в области уточнения аналитических зависимостей для инженерной методики при больших значениях продольной силы и малых значениях поперечного импульса. Это участок LCBC, показанный на рисунках пунктирной линией. При наличии значительных коррозионных повреждений наиболее точная оценка несущей способности в этой области — важный вопрос. Кроме того, представляются актуальными особенности разработки и использования инженерной методики при учете размеров очага коррозии, наличия двух очагов коррозии, приобретенных геометрических несовершенств и других аспектов, которые могут быть при реальном техническом состоянии колонн, находящихся в агрессивной среде. Подход к исследованию с построением LCBC может быть эффективно применен для оценки НДС в алгоритмах оптимиза-

ции несущих конструкций [31–33], реализующих поиск при многократно повторяющихся расчетах и меняющихся параметрах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная аналитическая методика позволяет приближенно оценить несущую способность центрально сжатых железобетонных колонн при поперечной импульсной нагрузке с учетом коррозионных повреждений. Результаты расчетов показали удовлетворительную точность по сравнению с конечно-элементным моделированием и натурным экспериментом. Наилучший результат по оценке предельной несущей способности колонн наблюдается в диапазоне 0,4–0,8 от предельного значения горизонтального импульса при сжатии силой, составляющей 0,25–0,7 от предельного значения. При этом отклонения результатов связаны с увеличением запаса прочности конструкции, что дает возможность пользоваться предложенными зависимостями при проектировании.

Предложена дискретно-временная модель учета коррозионных повреждений для объемных конечно-элементных схем, основанная на параболическом законе снижения механических характеристик бетона по глубине распространения коррозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Mahdavi G., Hariri-Ardebili M.A. Dynamic Behavior of Corroded RC Slabs with Macro-Level Stochastic Finite Element Simulations // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 239. P. 112056. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112056
2. Yu X., Robuschi S., Fernandez I., Lundgren K. Numerical Assessment of Bond-Slip Relationships for Naturally Corroded Plain Reinforcement Bars in Concrete Beams // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 239. P. 112309. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112309
3. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Hajiloo H. Strengthening of Corroded Reinforced Concrete Slabs under Multi-Impact Loading: Experimental Results and Numerical Analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 284. P. 122650. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122650
4. He S., Cao Z., Ma J., Zeng S., Li P., Wang H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/6693224
5. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond Degradation of Non-Uniformly Corroded Steel Rebars in Concrete // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392
6. Mari A., Bairan J.-M., Oller E., Duarte N. Modeling Serviceability Performance and Ultimate Capacity of Corroded Reinforced and Prestressed Concrete Structures // *Structural Concrete*. 2021. Vol. 23. Issue 1. Pp. 6–15. DOI: 10.1002/suco.202100159
7. Zhang W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., Gu X.-L. Corrosion Evolution of Steel Bars in RC Structures Based on Markov Chain Modeling // *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. P. 102037. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102037
8. Mahmoud K.A. Lateral Deformation Behavior of Eccentrically Loaded Slender RC Columns with Different Levels of Rotational End Restraint at Elevated Temperatures // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021. Vol. 12. Issue 1. Pp. 35–64. DOI: 10.1108/JSFE-04-2020-0014
9. Kashani M.M., Crewe A.J., Alexander N.A. Structural Capacity Assessment of Corroded RC Bridge Piers // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering*. 2017. Vol. 170. Issue 1. Pp. 28–41. DOI: 10.1680/jbren.15.00023
10. Yilmaz T., Kiraç N., Anil Ö. Experimental investigation of axially loaded reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading // *Structural Concrete*. 2019. Vol. 20. Issue 4. Pp. 1358–1378. DOI: 10.1002/suco.201800276
11. Wang X., Zhang Y., Su Y., Feng Y. Experimental Investigation on the Effect of Reinforcement Ratio to Capacity of RC Column to Resist Lateral Impact Loading // *Systems Engineering Procedia*. 2011. Vol. 1. Pp. 35–41. DOI: 10.1016/j.sepro.2011.08.007

12. Fan W., Liu B., Consolazio G.R. Residual Capacity of Axially Loaded Circular RC Columns after Lateral Low-Velocity Impact // *Journal of Structural Engineering*. 2019. Vol. 145. Issue 6. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002324
13. Liu B., Fan W., Huang X., Shao X., Kang L. A Simplified Method to Predict Damage of Axially-Loaded Circular RC Columns Under Lateral Impact Loading // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-020-00406-z
14. Zhao W., Qian J. Resistance Mechanism and Reliability Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Impact // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 136. P. 103413. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103413
15. Gholipour G., Zhang C., Mousavi A.A. Effects of Axial Load on Nonlinear Response of RC Columns Subjected to Lateral Impact Load: Ship-Pier Collision // *Engineering Failure Analysis*. 2018. Vol. 91. Pp. 397–418. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.055
16. Li X., Yin Y., Li T., Zhu X., Wang R. Analytical Study on Reinforced Concrete Columns and Composite Columns under Lateral Impact // *Coatings*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 152. DOI: 10.3390/coatings13010152
17. Anil O., Cem Yilmaz M., Barmaki W. Experimental and Numerical Study of RC Columns under Lateral Low-Velocity Impact Load // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2020. Vol. 173. Issue 8. Pp. 549–567. DOI: 10.1680/jstbu.18.00041
18. Anil Ö., Tuğrul Erdem R., Tokgöz M.N. Investigation of Lateral Impact Behavior of RC Columns // *Computers and Concrete*. 2018. Vol. 22. Issue 1. Pp. 123–132. DOI: 10.12989/cac.2018.22.1.123
19. Zhao W., Ye J. Dynamic Behavior and Damage Assessment of RC Columns Subjected to Lateral Soft Impact // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 251. P. 113476. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113476
20. Demartino C., Wu J.G., Xiao Y. Response of Shear-Deficient Reinforced Circular RC Columns under Lateral Impact Loading // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 109. Pp. 196–213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.06.011
21. Zhou X., Zhou M., Luo D., Wu B., Liu L. Study on the Nonlinear Response and Shear Behavior of RC Columns under Lateral Impact // *Structures*. 2021. Vol. 34. Pp. 3834–3850. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.094
22. Sun J.-M., Yi W.-J., Chen H., Peng F., Zhou Y., Zhang W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact // *Journal of Structural Engineering*. 2023. Vol. 149. Issue 1. DOI: 10.1061/jsendh/steng-11612
23. Swesi A.O., Cotsovos D.M., Val D.V. Effect of CFRP Strengthening on Response of RC Columns to Lateral Static and Impact Loads // *Composite Structures*. 2022. Vol. 287. P. 115356. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115356
24. Lai D., Demartino C., Xu J., Xu J., Xiao Y. GFRP Bar RC Columns under Lateral Low-Velocity Impact: An Experimental Investigation // *International Journal of Impact Engineering*. 2022. Vol. 170. P. 104365. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104365
25. Alekseytsev A.V. Mechanical Safety of Reinforced Concrete Frames under Complex Emergency Actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3 (103). DOI: 10.34910/MCE.103.6. EDN ILMNH.
26. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of Reinforced Concrete Beams under Local Mechanical and Corrosive Damage // *Engineering Optimization*. 2022. Vol. 55. Issue 11. Pp. 1905–1922. DOI: 10.1080/0305215X.2022.2134356
27. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete // *Journal of Structural Engineering*. 1988. Vol. 114. Issue 8. Pp. 1804–1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)
28. Feng D.C., Ding Z.D. A New Confined Concrete Model Considering the Strain Gradient Effect for RC Columns under Eccentric Loading // *Magazine of Concrete Research*. 2018. Vol. 70. Issue 23. Pp. 1189–1204. DOI: 10.1680/jmacr.18.00040
29. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Safety of Reinforced Concrete Columns: Effect of Initial Imperfections and Material Deterioration under Emergency Actions // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 1054. DOI: 10.3390/buildings13041054
30. Пузанков Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке : дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 136 с. EDN WLDCER.
31. Alekseytsev A.V., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost Minimization for Safety Enhancing of Timber Beam Structures in Historical Buildings // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703002
32. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of Steel Beam Structures for Frame Buildings Subject to Their Safety Requirements // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 7 (91). Pp. 3–15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.
33. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of Steel Frame Building Systems in Terms of Parameters and Reliability Requirements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 052003. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052003

Поступила в редакцию 6 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 6 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 26 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анатолий Викторович Алексейцев** — доктор технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Константин Валерьевич Юрусов — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: MIK-9514-2025, ORCID: 0009-0004-1970-3491; walrk@mail.ru.

Вклад авторов:

Алексейцев А.В. — формулирование концепции исследования, методика исследования, научное редактирование, формулирование выводов.

Юрусов К.В. — анализ источников и литературы, тестирование методики исследования, построение и анализ КЭ модели, подготовка текста, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Mahdavi G., Hariri-Ardebili M.A. Dynamic Behavior of Corroded RC Slabs with Macro-Level Stochastic Finite Element Simulations. *Engineering Structures*. 2021; 239:112056. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112056
2. Yu X., Robuschi S., Fernandez I., Lundgren K. Numerical Assessment of Bond-Slip Relationships for Naturally Corroded Plain Reinforcement Bars in Concrete Beams. *Engineering Structures*. 2021; 239:112309. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112309
3. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Hajiloo H. Strengthening of Corroded Reinforced Concrete Slabs under Multi-Impact Loading: Experimental Results and Numerical Analysis. *Construction and Building Materials*. 2021; 284:122650. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122650
4. He S., Cao Z., Ma J., Zeng S., Li P., Wang H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/6693224
5. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond Degradation of Non-Uniformly Corroded Steel Rebars in Concrete. *Engineering Structures*. 2021; 226:111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392
6. Mari A., Bairan J.-M., Oller E., Duarte N. Modeling Serviceability Performance and Ultimate Capacity of Corroded Reinforced and Prestressed Concrete Structures. *Structural Concrete*. 2021; 23(1):6-15. DOI: 10.1002/suco.202100159
7. Zhang W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., Gu X.-L. Corrosion Evolution of Steel Bars in RC Structures Based on Markov Chain Modeling. *Structural Safety*. 2021; 88:102037. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102037
8. Mahmoud K.A. Lateral Deformation Behavior of Eccentrically Loaded Slender RC Columns with Different Levels of Rotational End Restraint at Elevated Temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021; 12(1):35-64. DOI: 10.1108/JSFE-04-2020-0014
9. Kashani M.M., Crewe A.J., Alexander N.A. Structural Capacity Assessment of Corroded RC Bridge Piers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering*. 2017; 170(1):28-41. DOI: 10.1680/jbren.15.00023
10. Yilmaz T., Kiraç N., Anil Ö. Experimental investigation of axially loaded reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading. *Structural Concrete*. 2019; 20(4):1358-1378. DOI: 10.1002/suco.201800276
11. Wang X., Zhang Y., Su Y., Feng Y. Experimental Investigation on the Effect of Reinforcement Ratio to Capacity of RC Column to Resist Lateral Impact Loading. *Systems Engineering Procedia*. 2011; 1:35-41. DOI: 10.1016/j.sepro.2011.08.007
12. Fan W., Liu B., Consolazio G.R. Residual Capacity of Axially Loaded Circular RC Columns after Lateral Low-Velocity Impact. *Journal of Structural Engineering*. 2019; 145(6). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002324
13. Liu B., Fan W., Huang X., Shao X., Kang L. A Simplified Method to Predict Damage of Axially Loaded Circular RC Columns Under Lateral Impact Loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020; 14(1). DOI: 10.1186/s40069-020-00406-z
14. Zhao W., Qian J. Resistance Mechanism and Reliability Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020; 136:103413. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103413
15. Gholipour G., Zhang C., Mousavi A.A. Effects of Axial Load on Nonlinear Response of RC Columns Subjected to Lateral Impact Load: Ship-Pier Collision. *Engineering Failure Analysis*. 2018; 91:397-418. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.055
16. Li X., Yin Y., Li T., Zhu X., Wang R. Analytical Study on Reinforced Concrete Columns and Com-

- posite Columns under Lateral Impact. *Coatings*. 2023; 13(1):152. DOI: 10.3390/coatings13010152
17. Anil O., Cem Yilmaz M., Barmaki W. Experimental and Numerical Study of RC Columns under Lateral Low-Velocity Impact Load. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2020; 173(8):549-567. DOI: 10.1680/jstbu.18.00041
18. Anil Ö., Tuğrul Erdem R., Tokgöz M.N. Investigation of Lateral Impact Behavior of RC Columns. *Computers and Concrete*. 2018; 22(1):123-132. DOI: 10.12989/cac.2018.22.1.123
19. Zhao W., Ye J. Dynamic Behavior and Damage Assessment of RC Columns Subjected to Lateral Soft Impact. *Engineering Structures*. 2022; 251:113476. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113476
20. Demartino C., Wu J.G., Xiao Y. Response of Shear-Deficient Reinforced Circular RC Columns under Lateral Impact Loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2017; 109:196-213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.06.011
21. Zhou X., Zhou M., Luo D., Wu B., Liu L. Study on the Nonlinear Response and Shear Behavior of RC Columns under Lateral Impact. *Structures*. 2021; 34:3834-3850. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.094
22. Sun J.-M., Yi W.-J., Chen H., Peng F., Zhou Y., Zhang W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. *Journal of Structural Engineering*. 2023; 149(1). DOI: 10.1061/jsendh/steng-11612
23. Swesi A.O., Cotsovos D.M., Val D.V. Effect of CFRP Strengthening on Response of RC Columns to Lateral Static and Impact Loads. *Composite Structures*. 2022; 287:115356. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115356
24. Lai D., Demartino C., Xu J., Xu J., Xiao Y. GFRP Bar RC Columns under Lateral Low-Velocity Impact: An Experimental Investigation. *International Journal of Impact Engineering*. 2022; 170:104365. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104365
25. Alekseytsev A.V. Mechanical Safety of Reinforced Concrete Frames under Complex Emergency Actions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 3(103). DOI: 10.34910/MCE.103.6. EDN ILLMMNH.
26. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of Reinforced Concrete Beams under Local Mechanical and Corrosive Damage. *Engineering Optimization*. 2022; 55(11):1905-1922. DOI: 10.1080/0305215X.2022.2134356
27. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988; 114(8):1804-1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)
28. Feng D.C., Ding Z.D. A New Confined Concrete Model Considering the Strain Gradient Effect for RC Columns under Eccentric Loading. *Magazine of Concrete Research*. 2018; 70(23):1189-1204. DOI: 10.1680/jmacr.18.00040
29. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. *Safety of Reinforced Concrete Columns: Effect of Initial Imperfections and Material Deterioration under Emergency Actions*. Buildings. 2023; 13(4):1054. DOI: 10.3390/buildings13041054
30. Puzankov Yu.I. *Strength and deformability of compressed reinforced concrete elements under transverse dynamic loading: dissertation candidate of technical sciences*. Moscow, 1979; 136. EDN WLDCER. (rus.).
31. Alekseytsev A.V., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost Minimization for Safety Enhancing of Timber Beam Structures in Historical Buildings. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03002. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703002
32. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of Steel Beam Structures for Frame Buildings Subject to Their Safety Requirements. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 7(91):3-15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.
33. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of Steel Frame Building Systems in Terms of Parameters and Reliability Requirements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052003. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052003

Received December 6, 2024.

Adopted in revised form on December 6, 2024.

Approved for publication on February 26, 2025.

BIONOTES: **Anatoly V. Alekseytsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Konstantin V. Yurusov — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: MIK-9514-2025, ORCID: 0009-0004-1970-3491; walrk@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anatoly V. Alekseytsev — formulation of the research concept, research methodology, scientific editing, formulation of conclusions.

Konstantin V. Yurusov — analysis of sources and literature, testing of the research methodology, construction and analysis of the FE model, text preparation, formulation of conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.683-693

Деформирование бетона при объемном напряженном состоянии

Нгок Туен Ву, Евгения Николаевна Полякова*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность разработки аналитических моделей, описывающих нелинейное деформирование бетона в условиях сложного напряженного состояния, обусловлена их значимостью как в теоретическом, так и в прикладном аспектах. Ключевые факторы, которые должны учитываться при создании таких моделей, — неоднородность свойств бетонного материала, его структурное изменение при нагружении, возникновение трещин, а также явления, связанные с неравновесными процессами, протекающими в бетоне на протяжении длительного времени. Главная цель исследования — создание аналитической модели диаграммы деформирования бетона, позволяющей точно описывать нелинейное поведение бетона в условиях одноосного, двухосного и трехосного нагружения. Эта модель должна быть универсальной и простой в использовании. Важно, чтобы модель позволяла проводить анализ и максимально точно отражать полученные при проведении экспериментов с бетонами разных классов прочности результаты.

Материалы и методы. В процессе формирования модели, которая показывает поведение бетона с учетом одноосного напряженного состояния, решено включить в работу полиномиальную функцию четвертого порядка. Что объясняется тем, что это подходит для выполнения аппроксимации, которая имеет связь между напряжениями и относительными деформациями. После получения модели деформации бетона в условиях одноосного напряжения она была задействована в процессе формирования определяющих соотношений для объемного напряженного состояния в качестве основы.

Результаты. Сформирована аналитическая нелинейная формула, которая позволяет определить и показать наличие зависимости между напряжением и относительными деформациями бетона в условиях одноосного нагружения. Для наглядного представления данной зависимости используется непрерывная полиномиальная функция, которая описывает поведение бетона при любой степени деформирования. В ней же присутствует нисходящий участок диаграммы, который показывает, в частности, предельные деформации. Приведенная аналитическая зависимость может быть использована в качестве основной составляющей при установлении характеристик и свойств бетона в рамках составления определяющих соотношений в качестве описательного метода для указания на деформации бетона при объемном напряженном состоянии.

Выводы. Аналитическая зависимость может быть применена в виде ключевых характеристик, которые определяют и описывают свойства бетона в рамках задействования фундаментальных уравнений, представляющих поведение бетона при объемном напряженном состоянии. Данный способ является достаточно точным и станет отличным решением при осуществлении проектирования железобетонных конструкций в сфере инженерии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции, диаграмма состояния бетона, деформация, напряжение, ниспадающая ветвь, модуль упругости, секущий модуль деформаций, интенсивность деформаций сдвига, коэффициент Пуассона, сложное напряженное состояние

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ву Н.Т., Полякова Е.Н. Деформирование бетона при объемном напряженном состоянии // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 683–693. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.683-693

Автор, ответственный за переписку: Нгок Туен Ву, WuNgokTuen@gic.mgsu.ru.

Deformation of concrete under volumetric stress state

Ngoc Tuyen Vu, Yevgeniya N. Polyakova*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the development of analytical models describing nonlinear deformation of concrete under conditions of complex stress state is due to their importance both in theoretical and applied aspects. The key factors that should be taken into account when creating such models are the heterogeneity of concrete material properties, its structural change under loading, the occurrence of cracks, as well as phenomena associated with non-equilibrium processes occurring in concrete over a long period of time. The main objective of the study is to create an analytical model of the deformation diagram of concrete that allows an accurate description of the nonlinear behaviour of concrete under uniaxial, biaxial and triaxial loading conditions. This model should be versatile and easy to use. It is important that the model allows analysis and reflects as accurately as possible the results obtained from experiments with concrete of different strength classes.

Materials and methods. In the process of forming a model that shows the behaviour of concrete considering uniaxial stress state, it was decided to include a fourth order polynomial function in the work. Which is because it is suitable to perform an approximation that has a relationship between stresses and relative strains. After obtaining the model of concrete deformation under uniaxial stress, it was involved in the process of forming the constitutive relations for the volumetric stress state as a basis.

Results. An analytical nonlinear formula was formed to determine and show the existence of the dependence between stress and relative deformations of concrete under uniaxial loading conditions. To visualize this dependence, a continuous polynomial function is used, which describes the behaviour of concrete at any degree of deformation. It also contains a descending section of the diagram, which shows, in particular, the ultimate deformations. The given analytical dependence can be used as a basic component in establishing the characteristics and properties of concrete within the framework of the formulation of determining relations as a descriptive method to indicate the deformations of concrete under volumetric stress state.

Conclusions. The analytical relationship can be used in the form of key characteristics that define and describe the properties of concrete within the engagement of fundamental equations representing the behaviour of concrete under volumetric stress state. This method is quite accurate and will be an excellent solution when carrying out the design of reinforced concrete structures in the field of engineering.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, concrete state diagram, strain, stress, downward branch, modulus of elasticity, secant modulus of strain, shear strain intensity, Poisson's ratio, complex stress state

FOR CITATION: Vu N.T., Polyakova Ye.N. Deformation of concrete under volumetric stress state. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):683-693. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.683-693 (rus.).

Corresponding author: Ngoc Tuyen Vu, WuNgokTuen@gic.mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В инженерной практике распространено применение различных расчетных комплексов, среди которых можно выделить ABAQUS, ANSYS и прочие. Данные комплексы базируются на использовании методов конечных элементов и применяются, в частности, благодаря внедрению готовых модулей, направленных на осуществление моделирования бетонных и железобетонных сооружений, если при этом подразумеваются статические и динамические нагрузки. Стоит отметить, что эти комплексы работают с учетом стандартных для них физических моделей. Они были сформированы для того, чтобы делать расчеты в отношении тяжелых видов бетона с прочностью на сжатие не более В60. Поэтому, если потребуется подготовить расчеты для других видов бетона, то могут возникнуть сложности, поскольку не будет стандартизированных данных. Это вызывает необходимость создания индивидуальной методологии для решения конкретной задачи в процессе исследования. Причем, если речь идет о более серьезных типах нагружения, то задача начинает еще больше усложняться. Исходя из этого, делаем вывод, что вопрос формирования аналитических моделей нелинейного деформирования бетона в условиях сложного напряженного состояния, которые бы смогли принимать во внимание основные характеристики бетона, в настоящее время стоит довольно остро [1–6]. Указанная область сегодня недостаточно изучена, но имеется некоторое количество исследований по трем направлениям:

1) разработка аналитических моделей, которые предназначены для рассмотрения различных характеристик бетона, в частности, речь идет о реологических и механических свойствах;

2) формирование модели деформирования бетона в рамках рассмотрения плоского и объемного напряженного состояния, при этом должны быть

учтены характеристики бетона при одноосных напряжениях;

3) разработка математических моделей для железобетонных конструкций, которые учитывают неоднородность и неравновесность процессов в условиях плоского и объемного состояния.

В исследовании [7] рассматривается вопрос поиска актуальных подходов к решению данных задач, в том числе в нем говорится про определение критериев прочности бетона при объемном напряжении.

Вопрос о создании математических моделей, в рамках которых можно было бы описать поведение бетона при наличии деформаций, является не менее актуальным в научных кругах [8–11]. Одним из первых значимых вкладов в этой области стала работа О.Я. Берга [12], в которой установлено наличие двух характерных точек на диаграмме деформирования бетона: первая точка соответствует началу формирования внутренних трещин (так называемая нижняя параметрическая точка), а вторая точка — началу их нестабильного развития (верхняя параметрическая точка). А.А. Гвоздев предложил подход к моделированию нисходящего участка диаграммы, исходя из концепции накопления повреждений в структуре материала [13]. М.М. Холмянский и Е.А. Коган в своей работе [14] представили вариант обоснования формы диаграммы деформирования бетона на основе статистической теории прочности неоднородных тел. В.М. Бондаренко представил подход, базирующийся на энергетических принципах [15]. Автор Н.И. Карпенко предложил представлять диаграмму деформирования бетона функцией, описывающей изменение секущих и касательных модулей упругости [16]. Методику вычисления накоплений нелинейных деформаций с ростом числа циклов разработал В.А. Ерышев, в ней учитываются история и уровни нагружения, а также изменение предельных напряжений диаграммы [17]. И.М. Безгодов анализировал различные

экспериментальные способы получения полных диаграмм деформирования и предложил новый метод испытания и построения диаграмм с анализом кривых деформирования по результатам испытаний двух классов бетона [18]. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение проводил О.В. Радайкин [19]. Влияние вида функциональной зависимости напряжений от деформаций на точность определения прогибов пластины из нелинейно деформируемого материала исследовал В.П. Селяев [20]. А.Г. Тамразян разработал диаграмму деформирования бетона, ограниченного обоймой из композитных материалов, которая имеет разрывы по высоте [21]. Анализ различных способов построения диаграмм деформирования бетона при осевом растяжении на основе экспериментальных данных посвящено исследование В.В. Адищева [22]. Тем не менее наиболее изучены сегодня эмпирические и полумпирические методы, предполагающие аппроксимацию экспериментальных данных с использованием различных кривых, таких как дробные, степенные и другие функции. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

Диаграмма бетона в действующей европейской норме EN 1992-1-1 представлена кривой вида:

$$\sigma_b = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} R_b. \quad (1)$$

При этом $\eta = \varepsilon_b / \hat{\varepsilon}_b$ здесь является определением отношения текущего значения деформации ε_b к предельному значению деформации бетона. При этом предельное значение сопоставимо с вершиной диаграммы $\hat{\varepsilon}_b$; коэффициент k определяется посредством применения следующей формулы $k = 1,05E_b\hat{\varepsilon}_b/R_b$; E_b выступает в виде начального модуля упругости бетона, для расчета которого необходимо принимать во внимание уровень напряжения $\sigma_b = 0,4R_b$.

Несмотря на то, что указанный метод аппроксимации позволяет достичь наиболее верных результатов на основном участке диаграммы деформирования бетона, у зависимости (1) есть несколько существенных недостатков. Один из них заключается в том, что интегрирование аппроксимации происходит достаточно сложно, в том числе это касается процесса выявления изгибающего момента железобетонной конструкции, когда обязательным условием служит интегрирование напряжений бетона в рамках элементарной площадки. Другой момент состоит в том, что степень деформации бетона по заданному уровню напряжения определяется с некоторыми сложностями.

Использовать экспоненциальную функцию для моделирования диаграммы деформирования бетона предложил Г.В. Мурашкин [23]:

$$\sigma_b = a_c \varepsilon_b^{b_c} \exp\left(\frac{-b_c \varepsilon_b}{\hat{\varepsilon}_b}\right). \quad (2)$$

Коэффициенты a_c и b_c вычисляются из системы двух уравнений, полученных на основе условия $d\sigma_b(\hat{\varepsilon}_b)/d\varepsilon_b = 0$ в вершине диаграммы и зависимости $E_b = \sigma_b/\varepsilon_b$ на квазиупругом участке, например, при $\sigma_b = 0,4R_b$. Основной недостаток аналитической зависимости (2) — трудоемкость вычисления параметров a_c и b_c , а также сложность решения обратной задачи определения деформаций при заданных напряжениях.

В своих научных трудах Г.А. Гениев [24] представляет диаграмму, которая описывает поведение бетона при деформации. Она представляет собой параболическую функцию:

$$\sigma_b = E_b \left(1 - \frac{\varepsilon_b}{2\hat{\varepsilon}_b}\right) \varepsilon_b. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что при значительных изменениях в структуре бетона данная функция может быть не совсем точна, но в целом она является довольно простой для встраивания в систему.

В своей работе [16] Н.И. Карпенко предложил представлять диаграмму деформирования бетона посредством функции, описывающей изменение секущих и касательных модулей упругости:

$$\sigma_b = v_b E_b \varepsilon_b, \quad (4)$$

где v_b — коэффициент изменения секущего модуля, для определения которого используется уравнение:

$$v_b = \hat{v}_b \pm (v_0 - \hat{v}_b) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение данного графика более подробно. Так, $\hat{v}_b = \hat{\sigma}_b / (\hat{\varepsilon}_b E_b)$ соответствует верхней точке диаграммы при условии, что $\sigma_b = \hat{\sigma}_b$; v_0 — точка начала диаграммы, а вместе с тем и начальное значение перемен в секущем модуле; коэффициенты ω_1 и ω_2 — критерии, указывающие на полноту диаграммы материала ($\omega_2 = 1 - \omega_1$); $\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b$ показывает то, насколько было увеличено напряжение.

Формула (5) предполагает знак минус для нисходящей ветви кривой, а для восходящей — знак плюс.

Предлагаемая нелинейная модель диаграммы деформирования бетона применена в российском нормативном документе СП 63.13330.2018 и обеспечивает адекватное описание экспериментальных кривых, полученных для бетонов различных классов прочности, подвергаемых кратковременному одноосному сжатию. Трудности в вычислениях могут заключаться и в том, что присутствует двойной знак \pm , а также имеются различия в следующих коэффициентах v_0 , ω_1 и ω_2 в зависимости от того, о какой ветви диаграммы мы говорим: нисходящей или восходящей. Также стоит отметить, что вычисления затрудняет зависимость коэффициента изменения секущего модуля от уровня напряжений $\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b$. Сложности возникают потому, что основная часть расчетов сегодня основывается на значениях деформаций или их уровнях.

Исходя из указанной информации, ключевая задача настоящего исследования — выведение дифференцируемой нелинейной диаграммы деформирования бетона, которая будет отвечать требованиям простоты в процессе интегрирования. Также одним из ее преимуществ должна быть возможность использования при разных типах нагружения бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Диаграмма деформирования бетона при одноосном сжатии

С целью наглядного представления зависимости между напряжениями и деформациями бетона при одноосном напряжении используем полиномиальную функцию четвертой степени:

$$\sigma_b = E_b \left[1 + a \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} + b \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right] \varepsilon_b, \quad (6)$$

где a , b и c — искомые коэффициенты, они определяют форму диаграммы деформирования бетона. При этом значение $a \varepsilon_{ult}$ является соответствующим деформации бетона в той точке, где построенный график достигает своего максимального значения.

Аналитическая зависимость отличается простотой процесса интеграции по переменной деформации. Это повышает ее эффективность в качестве инструмента при построении деформационных моделей, а также практических расчетах железобетонных конструкций. В процессе выявления параметров полиномиальной функции (6) учитываются результаты анализа граничных условий за счет применения системы нормируемых индикаторов, которые могут быть представлены в форме ряда соотношений.

1. Первая производная функции, описывающая зависимость деформации бетона от напряжения в формате диаграммы, которая, в свою очередь, соответствует тангенсу угла наклона касательной к кривой в точке $\varepsilon_b = 0$, должна быть равной начальному модулю упругости бетона E_b .

В процессе проведения дифференцирования выражения (6) по переменной ε_b выведем математическую модель в отношении модуля деформации бетона:

$$\frac{d\sigma_b}{d\varepsilon_b} = E_b \left[1 + 2a \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} + 3b \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + 4c \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right]. \quad (7)$$

В исходном положении кривой, где отмечается нулевое значение деформации ε_b , начальный модуль упругости бетона E_b и касательный модуль соответствуют друг другу. Исходя из этого, можно утверждать, что начальное условие будет реализовано независимо от того, какое значение будет у коэффициентов a , b и c .

2. Максимальное значение напряжения отмечается в том случае, когда деформация бетона достигает до $\varepsilon_b = \varepsilon_{ult}$. При этом значение напряжения обозначается как $\sigma_{b,max} = R_{b,ser}$.

Если произвести подстановку $\varepsilon_b = \varepsilon_{ult}$ и $\sigma_b = R_{b,ser}$ в уравнение (6), получим следующее выражение:

$$E_b [1 + a + b + c] \varepsilon_{ult} = R_{b,ser}. \quad (8)$$

3. Первая производная функции, которая описывает степень зависимости напряжения от деформации бетона ($d\sigma_b/d\varepsilon_b$), равняется нулю в том случае, если деформация равна $\varepsilon_b = \varepsilon_{ult}$.

$$\left. \frac{d\sigma_b}{d\varepsilon_b} \right|_{\varepsilon_b = \varepsilon_{ult}} = 0 \text{ или } 1 + 2a + 3b + 4c = 0. \quad (9)$$

4. Если бетон деформируется до установленной степени, а именно достижения им значения $\varepsilon_b = \beta \varepsilon_{ult}$ ($\beta > 1$), напряжение в нем доходит до определенного уровня, который составляет какую-то часть от наибольшего значения. Это значение может быть обозначено следующей формулой: $\sigma_b = \theta R_{b,ser}$ ($\theta < 1$). При этом оно соответствует деформациям и напряжениям, которые относятся к нисходящей части графика зависимости деформаций от напряжения. Если данные значения будут подставлены в уравнение (6), получится формула:

$$\sigma_b(\beta \varepsilon_{ult}) = \theta R_{b,ser} \quad (10)$$

или $E_b [1 + \beta a + \beta^2 b + \beta^3 c] \beta \varepsilon_{ult} = \theta R_{b,ser}$.

Для того чтобы определить коэффициенты диаграммы деформирования бетона, необходимо произвести решение системы уравнений, которая включает в себя уравнения (8)–(10):

$$\begin{cases} a = \frac{R_{b,ser} (3\beta^4 - 4\beta^3 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{2\beta + 1}{\beta}; \\ b = -\frac{2R_{b,ser} (\beta^4 - 2\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} + \frac{\beta + 2}{\beta}; \\ c = \frac{R_{b,ser} (2\beta^3 - 3\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{1}{\beta}. \end{cases} \quad (11)$$

Если в выражении (6) будут задействованы коэффициенты (11), то удастся построить аналитическую модель диаграммы поведения бетона при деформировании в результате одноосного напряженного состояния:

$$\begin{aligned} \sigma_b = E_b \left[1 + \left(\frac{R_{b,ser} (3\beta^4 - 4\beta^3 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{2\beta + 1}{\beta} \right) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} + \right. \\ \left. + \left(-\frac{2R_{b,ser} (\beta^4 - 2\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} + \frac{\beta + 2}{\beta} \right) \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{R_{b,ser} (2\beta^3 - 3\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right] \varepsilon_b. \quad (12) \end{aligned}$$

В рамках указанной модели для описания связи между деформациями и напряжением используется одно уравнение (12). Его особенность заключается в том, что при его включении в работу удается достичь верных результатов как в отношении нисходящей, так и в отношении восходящей ветви кривой. Это позволяет говорить о его универсальности, простоте и удобстве в процессе реализации расчетов с применением высокотехнологичных решений. Еще одной отличительной особенностью является то, что в этой модели учитываются только те свойства и параметры бетона, которые можно измерить и оценить, включая его прочность и деформации. Благодаря этому получается обойтись без внедрения дополнительных эмпирических коэффициентов. Также приведенное выше уравнение дает возможность произвести оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) нагруженных конструкций посредством включения значений напряжений и деформаций в сжатом бетоне, а не только за счет использования интегральных величин. В процессе анализа характеристик указанного графика следует принимать во внимание свойства материала, в частности: относительную деформацию в вершине диаграммы при осевом сжатии ε_{ult} ; величину начального модуля упругости бетона и напряжение в вершине диаграммы $R_{b,ser}$. Для определения степени деформирования бетона, если речь идет о наивысших значениях деформаций в точке ε_{ult} , используется следующая формула, согласно данным [18]:

$$\varepsilon_{ult} = \frac{B}{E_b} \lambda \frac{1 + 0,75\lambda B/60 + 0,2\lambda/B}{0,12 + B/60 + 0,2/B}, \quad (13)$$

где B — класс бетона по прочности на сжатие; λ — безразмерный коэффициент, выявление которого происходит при учете типа рассматриваемого бетона. Так, $\lambda = 1$ соответствует тяжелому и мелкозернистому бетону; $\lambda = D/2400$ — легкому бетону средней плотности D , которая может быть измерена в кг/м^3 ; если речь идет о ячеистом бетоне, то используется $\lambda = 0,25 + 0,35B$.

Определение зависимостей между напряжениями и деформациями для бетона в условиях объемного напряженного состояния

Исследование научной работы [19] показало, что довольно сложно описать классическими соотношениями механики твердого деформируемого тела процесс деформирования бетона, который является материалом с неоднородной структурой и склонностью к образованию трещин при нагружении определенной степени. При этом, согласно мнению большинства современных экспертов, двухосные и трехосные напряженные состояния оказывают значительное воздействие на некоторые параметры и характеристики бетона [7]. Из сказанного можно сделать вывод, что включение в работу уравнения (12) позволит эффективно рассмотреть бетон

при одноосном напряжении, а также максимально точно определить ключевые параметры. Для наглядного представления наличия связи между характеристиками НДС при объемном напряжении бетона, принимая во внимание ниспадающую ветвь деформации, следует использовать уравнение:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bx} &= \frac{1}{E(\Gamma)} [\sigma_{bx} - \nu(\sigma_{by} + \sigma_{bz})]; \\ \varepsilon_{by} &= \frac{1}{E(\Gamma)} [\sigma_{by} - \nu(\sigma_{bx} + \sigma_{bz})]; \\ \varepsilon_{bz} &= \frac{1}{E(\Gamma)} [\sigma_{bz} - \nu(\sigma_{bx} + \sigma_{by})]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\gamma_{bxy} = \frac{\tau_{bxy}}{G(\Gamma)}; \gamma_{byz} = \frac{\tau_{byz}}{G(\Gamma)}; \gamma_{bzx} = \frac{\tau_{bzx}}{G(\Gamma)},$$

где

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{by})^2 + (\varepsilon_{by} - \varepsilon_{bz})^2 + (\varepsilon_{bz} - \varepsilon_{bx})^2} + \frac{3}{2} (\gamma_{bxy}^2 + \gamma_{byz}^2 + \gamma_{bzx}^2)} \quad (15)$$

представляет собой интенсивность деформаций сдвига;

$$\begin{aligned} G(\Gamma) &= G_b \left[1 + a \frac{\Gamma}{\Gamma_s} + b \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 + c \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^3 \right] = \\ &= G_b \left[1 + \left(\frac{R_{b,ser} (3\beta^4 - 4\beta^3 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{2\beta + 1}{\beta} \right) \frac{\Gamma}{\Gamma_s} + \right. \\ &+ \left(-\frac{2R_{b,ser} (\beta^4 - 2\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} + \frac{\beta + 2}{\beta} \right) \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 + \\ &+ \left. \left(\frac{R_{b,ser} (2\beta^3 - 3\beta^2 + \theta)}{E_b \beta^2 \varepsilon_{ult} (\beta - 1)^2} - \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

обозначает секущий модуль сдвига; где Γ_s — максимальное значение силы деформаций сдвига, которое находится в соответствии с указанным видом состояния напряжения; $E(\Gamma) = 2(1 + \nu)G(\Gamma)$ — текущий модуль деформаций; ν — коэффициент бокового расширения.

Ключевые свойства параметров бетона выявляются на основе таких параметров, которые указывают на наличие связи между деформациями и напряжениями при одноосном напряженном состоянии. При этом они представляются при помощи формулы (12) и имеют соответствие с определенными коэффициентами a , b , c , используемыми при вычислении секущего модуля $G(\Gamma)$. Определяющие соотношения (16) могут быть преобразованы для выражения напряжений либо деформации

ций. В ситуации, когда соотношения разрешаются относительно напряжений, они принимают вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{bx} &= 2G(\Gamma) \left[\varepsilon_{bx} + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta \right]; \\ \sigma_{by} &= 2G(\Gamma) \left[\varepsilon_{by} + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta \right]; \\ \sigma_{bz} &= 2G(\Gamma) \left[\varepsilon_{bz} + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta \right]; \\ \tau_{bxy} &= G(\Gamma) \gamma_{bxy}; \quad \tau_{byz} = G(\Gamma) \gamma_{byz}; \\ \tau_{bzx} &= G(\Gamma) \gamma_{bzx}. \end{aligned} \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа представленного варианта зависимостей между напряжениями и деформациями в сложнапряженном бетоне рассмотрим некоторые частные случаи.

Одноосное напряженное состояние. При одноосном сжатии мы имеем следующие начальные условия: $\sigma_{bx} \neq 0$; $\sigma_{by} = \sigma_{bz} = \tau_{bxy} = \tau_{byz} = \tau_{bzx}$; $\varepsilon_{bx} \neq 0$; $\varepsilon_{by} = \varepsilon_{bz} = \nu(-\varepsilon_{bx})$; $\gamma_{bxy} = \gamma_{byz} = \gamma_{bzx} = 0$.

Значение интенсивности деформаций сдвига при этих условиях определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{by})^2 + (\varepsilon_{by} - \varepsilon_{bz})^2 +}} \\ &\sqrt{(\varepsilon_{bz} - \varepsilon_{bx})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{bxy}^2 + \gamma_{byz}^2 + \gamma_{bzx}^2)}} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{[\varepsilon_{bx} + \nu\varepsilon_{bx}]^2 + [-\nu\varepsilon_{bx} + \nu\varepsilon_{bx}]^2 +}} \\ &\sqrt{[-\nu\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{bx}]^2 + \frac{3}{2}(0^2 + 0^2 + 0^2)}} \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}}(1+\nu)\varepsilon_{bx}. \end{aligned}$$

Значение предельной интенсивности деформаций сдвига устанавливается по выражению:

$$\Gamma_s = \frac{2}{\sqrt{3}}(1+\nu)\varepsilon_{ult}.$$

Соответственно значение объемной деформации бетона будет равно:

$$\theta = \varepsilon_{bx} = \nu(-\varepsilon_{bx}) + \nu(-\varepsilon_{bx}) = (1-2\nu)\varepsilon_{bx}.$$

Секунный модуль сдвига:

$$\begin{aligned} G(\Gamma) &= G_b \left[1 + a \frac{\Gamma}{\Gamma_s} + b \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 + c \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^3 \right] = \\ &= \frac{E_b}{2(1+\nu)} \left[1 + a \frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} + b \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right]. \end{aligned}$$

Подставляя записанные параметры в уравнение (16), получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{bx} &= 2G(\Gamma) \left[\varepsilon_{bx} + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta \right] = \\ &= 2 \frac{E_b}{2(1+\nu)} \left[1 + a \frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} + b \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right] \times \\ &\quad \times \left[\varepsilon_{bx} + \frac{\nu}{1-2\nu} (1-2\nu) \varepsilon_{bx} \right] \\ &= E_b \left[1 + a \frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} + b \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_{bx}}{\varepsilon_{ult}} \right)^3 \right] \varepsilon_{bx}. \end{aligned}$$

Легко заметить, что полученное соотношение идентично диаграмме (6), которая была представлена ранее для случая одноосного сжатия. Для визуализации результатов построим график зависимости «напряжение – деформация», основываясь на уравнении (6), для бетона класса В60 при следующих исходных параметрах: $B = 60$, $E_b = 4 \cdot 10^4$ МПа; $R_{b,ser} = 43$ МПа, $R_{bt,ser} = 2,5$ МПа; $\beta = 2$; $\theta = 0,7$; $\lambda = 1$.

Установим значение деформаций в вершине диаграммы по формуле (12):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ult} &= \frac{60}{4 \cdot 10^4} \cdot 1 \times \\ &\times \frac{1 + 0,75 \cdot 1 \cdot 60/60 + 0,2 \cdot 1/60}{0,12 + 60/60 + 0,2/60} = \\ &= 2,341 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Коэффициенты диаграммы деформирования бетона определим по формулам (11):

$$\begin{aligned} a &= \frac{43(3 \cdot 2^4 - 4 \cdot 2^3 + 0,7)}{4 \cdot 10^4 \cdot 2^2 \cdot 2,341 \cdot 10^{-3} (2-1)^2} - \\ &\quad - \frac{2 \cdot 2 + 1}{2} = -0,583; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= -\frac{2 \cdot 43(2^4 - 2 \cdot 2^2 + 0,7)}{4 \cdot 10^4 \cdot 2^2 \cdot 2,341 \cdot 10^{-3} (2-1)^2} + \\ &\quad + \frac{2+2}{2} = 0,003; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{43(2 \cdot 2^3 - 3 \cdot 2^2 + 0,7)}{4 \cdot 10^4 \cdot 2^2 \cdot 2,341 \cdot 10^{-3} (2-1)^2} - \\ &\quad - \frac{1}{2} = 0,040. \end{aligned}$$

Тогда диаграмма деформирования бетона В60, полученная из зависимости (6), имеет вид:

$$\sigma_b = 4 \cdot 10^4 \left[1 - 0,583 \frac{\varepsilon_b}{2,112 \cdot 10^{-3}} + \right.$$

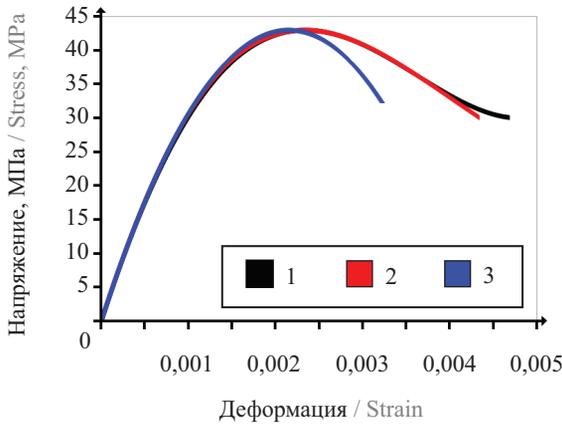


Рис. 1. Диаграммы деформирования для бетона В60: 1 — предложенная; 2 — диаграмма Н.И. Карпенко; 3 — диаграмма Г.А. Гениева

Fig. 1. Deformation diagrams for concrete B60: 1 — proposed; 2 — diagram of N.I. Karpenko; 3 — diagram of G.A. Geniev

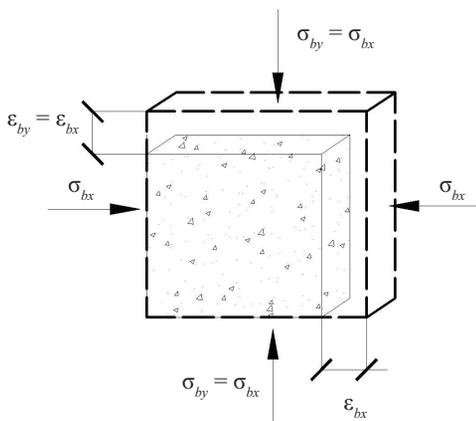


Рис. 2. Схема двухосного равномерного сжатия бетона

Fig. 2. Diagram of biaxial uniform compression of concrete

$$+ 0,02 \cdot \left(\frac{\epsilon_b}{2,112 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + 0,040 \cdot \left(\frac{\epsilon_b}{2,112 \cdot 10^{-3}} \right)^3 \Big] \epsilon_b.$$

Графически зависимость (17) в сопоставлении с аналогичными диаграммами, полученными по модели Г.А. Гениева [24] и модели Н.И. Карпенко [25], представлена на рис. 1. Как было отмечено, диаграмма Н.И. Карпенко хорошо описывает опытные зависимости одноосного сжатого бетона. Поэтому при анализе будем использовать ее в качестве некоторого эталона. При сравнении приведенных графиков становится очевидно, что диаграмма деформирования, которую разработал Г.А. Гениев, как правило, занижает величину деформаций бетона, когда рассматривается область предельных напряжений $\sigma_b = R_b$. Рассматривая диаграмму, которая была получена с учетом зависимости (17), можно отметить ее серьезную соразмерность графику, который был сформирован в процессе исследований Н.И. Карпенко. При этом важно отметить тот факт, что указанное соотношение (17) представляет собой непрерывную функцию. Это указывает на то, что в данном случае присутствует множество положительных моментов, касающихся реализации расчетов, особенно при проведении сравнения с иными диаграммами.

Двухосное равномерное сжатие. При плоском напряженном состоянии — двухосном равномерном сжатии $\sigma_{bx} = \sigma_{by}$; $\sigma_{bz} = 0$ (рис. 2).

На основе условия прочности Г.А. Гениева [24] предельное значение напряжения $\sigma_{bx,ult}$ составит:

$$\sigma_{bx,ult} = R_b \left[\sqrt{1 - \frac{R_{bt}}{R_b} + \left(\frac{R_{bt}}{R_b} \right)^2} + \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b} \right) \right] = 43 \left[\sqrt{1 - \frac{2,5}{43} + \left(\frac{2,5}{43} \right)^2} + \left(1 - \frac{2,5}{43} \right) \right] = 82,306 \text{ МПа.}$$

Интенсивность касательных напряжений определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{bx} - \sigma_{by})^2 + (\sigma_{by} - \sigma_{bz})^2 + (\sigma_{bz} - \sigma_{bx})^2 + 6(\tau_{bxy}^2 + \tau_{byz}^2 + \tau_{bzx}^2)} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{bx} - \sigma_{bx})^2 + (\sigma_{bx} - 0)^2 + (0 - \sigma_{bx})^2 + 6(0^2 + 0^2 + 0^2)} = \frac{\sigma_{bx}}{\sqrt{3}}.$$

Для того чтобы выявить максимальное значение силы касательных напряжений, следует произвести замену напряжения σ_x на его максимальное значение $\sigma_{bx,ult}$:

$$T_s = \frac{\sigma_{bx,ult}}{\sqrt{3}} = \frac{82,306}{\sqrt{3}} = 47,519 \text{ МПа.}$$

При этом для установления силы деформаций сдвига в данном случае необходимо воспользоваться следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{by})^2 + (\varepsilon_{by} - \varepsilon_{bz})^2 + (\varepsilon_{bz} - \varepsilon_{bx})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{bxy}^2 + \gamma_{byz}^2 + \gamma_{bzx}^2)}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{[\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{bx}]^2 + [\varepsilon_{bx} - \nu(-2\varepsilon_{bx})]^2 + [\nu(-2\varepsilon_{bx}) - \varepsilon_{bx}]^2 + \frac{3}{2}(0^2 + 0^2 + 0^2)}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}}(1 + 2\nu)\varepsilon_{bx} = \sqrt{\frac{2}{3}}\left(1 + 2\frac{1}{6}\right)\varepsilon_{bx} = 1,089\varepsilon_{bx}. \end{aligned}$$

Предельное значение интенсивности деформаций сдвига будет равно:

$$\Gamma_s = \frac{T_s}{\frac{E_b}{2(1+\nu)}(1+a+b+c)} = \frac{47,519}{\frac{4 \cdot 10^4}{2(1+1/6)}(1-0,583+0,003+0,040)} = 0,00603.$$

Значение объемной деформации плосконапряженного бетона определится из выражения:

$$\begin{aligned} \theta &= \varepsilon_{bx} + \varepsilon_{by} + \varepsilon_{bz} = \varepsilon_{bx} + \varepsilon_{bx} + \nu(-2\varepsilon_{bx}) = \\ &= 2(1 - \nu)\varepsilon_{bx} = 5/3 \varepsilon_{bx}; \end{aligned}$$

$$\theta = \varepsilon_{bx} + \varepsilon_{by} + \varepsilon_{bz} = \varepsilon_{bx} + \varepsilon_{bx} + \nu(-2\varepsilon_{bx}) = 2(1 - \nu)\varepsilon_{bx} = 5/3 \varepsilon_{bx}.$$

В результате подстановки в уравнение (16) рассчитанных значений для деформаций и напряжений для бетона класса В60 можно построить график деформации бетона при условии двухосного равномерного сжатия (рис. 3, кривая 2):

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= 2G(\Gamma) \left[\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta \right] = 2 \frac{E_b}{2(1+\nu)} \left[1 + a \frac{\Gamma}{\Gamma_s} + b \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 + c \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^3 \right] \cdot \left[\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{5}{3} \varepsilon_x \right] = \\ &= \frac{4 \cdot 10^4}{(1+1/6)} \left[1 - 0,583 \frac{1,089\varepsilon_x}{0,00603} + 0,003 \left(\frac{1,089\varepsilon_x}{0,00603} \right)^2 + 0,040 \left(\frac{1,089\varepsilon_x}{0,00603} \right)^3 \right] \cdot \left[\varepsilon_x + \frac{1/6}{1-2 \cdot 1/6} \cdot \frac{5}{3} \varepsilon_x \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

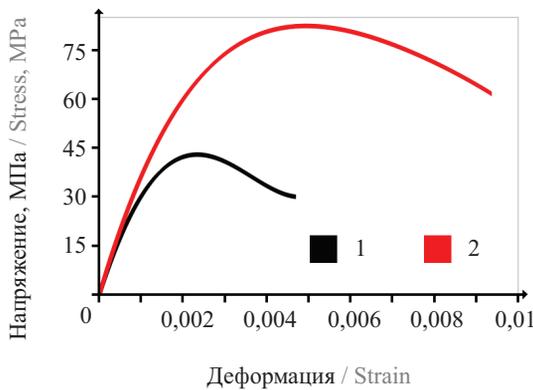


Рис. 3. Предложенные диаграммы деформирования для бетона В60: 1 — при одноосном сжатии; 2 — при двухосном равномерном сжатии

Fig. 3. Proposed deformation diagrams for concrete B60: 1 — under uniaxial compression; 2 — under biaxial uniform compression

На рис. 3 также представлена диаграмма деформирования бетона класса В60 при одноосном сжатии, что дает возможность провести качественное сравнение. Итогом данного сравнения является

вывод, указывающий на то, что прочность и склонность к деформациям у бетона изменились в лучшую сторону в условиях двухосного равномерного сжатия по сравнению с одноосным нагружением. В частности, в рассматриваемом примере зафиксировано повышение максимального напряжения в 2,8 раза, а предельной деформации, соответствующей максимальному напряжению, — в 2,5 раза. Эти результаты демонстрируют высокую корреляцию с экспериментальными исследованиями, проведенными А.А. Гвоздевым [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках настоящего исследования была сформирована концепция построения модели нелинейной зависимости, которая характерна деформациям и напряжениям бетона при условии одноосного нагружения. В рамках концепции рассмотрена единая непрерывная полиномиальная функция на всем диапазоне деформирования. При этом она включает и нисходящую ветвь, которая располагается после того, как кривая достигает своих значений. Сделан вывод, что данная зависимость может служить фундаментом при рассмотрении и определении

характеристик бетона при объемном напряженном состоянии. Полученные в результате функции связи между интенсивностью напряжений и деформаций в сложнапряженном бетоне соответствуют физи-

ческим принципам деформирования, обладают достаточной точностью и могут быть рекомендованы для практического применения при проектировании железобетонных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhou W., Feng P., Lin H. Constitutive relations of coral aggregate concrete under uniaxial and triaxial compression // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. P. 118957. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118957
2. Tu H., Zhou H., Lu J., Gao Y., Shi L. Elastoplastic coupling analysis of high-strength concrete based on tests and the Mohr-Coulomb criterion // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 255. P. 119375. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119375
3. Zhao L., Zhang L., Mao J., Liu Z. An elastoplastic damage model of concrete under cyclic loading and its numerical implementation // *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 273. P. 108714. DOI: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2022.108714
4. Lu D., Su C., Zhou X., Wang G., Du X. A cohesion-friction combined hardening plastic model of concrete with the nonorthogonal flow rule: Theory and numerical implementation // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 325. P. 126586. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126586
5. Wang G., Lu D., Zhou X., Wu Y., Du X., Xiao Y. A stress-path-independent damage variable for concrete under multiaxial stress conditions // *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 206. Pp. 59–74. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2020.09.012
6. Lu D.X., Nguyen N.H.T., Bui H.H. A cohesive viscoelastic-elastoplastic-damage model for DEM and its applications to predict the rate- and time-dependent behaviour of asphalt concretes // *International Journal of Plasticity*. 2022. Vol. 157. P. 103391. DOI: 10.1016/J.IJPLAS.2022.103391
7. Корсун В.И., Карпенко С.Н., Макаренко С.Ю., Недорезов А.В. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 5 (97). С. 16–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30. EDN HYNCLS.
8. Панфилов Д.А., Пищулев А.А., Гимадетдинов К.И. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 3. С. 80–84. EDN RYGLKB.
9. Римшин В.И., Кришан А.Л., Мухаметзянов А.И. Построение диаграммы деформирования одноосно сжатого бетона // *Вестник МГСУ*. 2015. № 6. С. 23–31. EDN TYCWVB.
10. Мурашкин В.Г. К вопросу применения моделей деформирования бетона при реконструкции // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 4 (19). С. 41–44. DOI: 10.51608/26867818_2022_4_41. EDN YODXVE.
11. Трещев А.А., Захарова И.А., Судакова И.А. О вариантах выбора диаграмм деформирования композитных материалов и не только // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 2 (17). С. 81–90. DOI: 10.51608/26867818_2022_2_81. EDN DJPYVA.
12. Берг О.Л. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1962. 96 с.
13. Гвоздев А.А. О перераспределении усилий в статически неопределимых железобетонных обычных и предварительно напряженных конструкциях. М.: Госстройиздат, 1955. 127 с.
14. Холмянский М.М., Коган Е.А. О прочности и трещиностойкости нормированного бетона при неоднородном растяжении с контролем деформаций и усилий // *Предельные состояния бетонных и железобетонных сооружений: мат. конференций и совещаний по гидротехнике*. 1982. С. 202–205.
15. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков, 1968. 324 с.
16. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких отрицательных температур // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. № 6 (714). С. 5–17. EDN AJBMUG.
17. Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагружениях // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2005. № 10 (562). С. 109–114. EDN PFAKVN.
18. Безгодов И.М., Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 34–36. EDN SYTIYL.
19. Радайкин О.В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 10. С. 29–39. DOI: 10.34031/article_5db33945315bb4.76965991. EDN MPQNBL.
20. Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Сорочкин Е.В. Аналитическое описание диаграмм деформирования бетона для расчета прогибов пластин из нелинейно деформируемого материала // *Стро-*

тельство и реконструкция. 2018. № 3 (77). С. 22–30. EDN OVHMHN.

21. Тамразян А.Г., Черник В.И. Диаграмма деформирования бетона, ограниченного дискретной композитной облойкой // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 43–53. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.43-53. EDN JSBMLZ.

22. Адищев В.В., Березина Э.В., Еришова Н.В. Экспериментальная апробация метода трансформации эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 8–9 (632–633). С. 118–124. EDN OZNFUR.

23. Murashkin V., Murashkin G. Application of concrete deformation model for calculation of bearing

capacity of reinforced concrete structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04008. DOI: 10.1051/mateconf/201819604008

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

25. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The Limiting Values of Moments And Deformations Ratio in Strength Calculations Using Specified Material Diagrams // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 032024. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032024

26. Гвоздев А.А. Прочность бетона при двухосном напряженном состоянии // Бетон и железобетон. 1974. № 7. С. 10–11.

Поступила в редакцию 13 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 25 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 26 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Нгок Туен Ву** — кандидат технических наук, доцент кафедры фундаментального образования; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2566-4260; РИНЦ ID: 832264, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; WuNgokTuen@gic.mgsu.ru;

Евгения Николаевна Полякова — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; evgeniapolakova256@gmail.com.

Вклад авторов:

Ву Н.Т. — научное руководство, концептуализация, курирование данных и подготовка первоначального проекта.

Полякова Е.Н. — методология, формальный анализ, подготовка первоначального проекта, визуализация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhou W., Feng P., Lin H. Constitutive relations of coral aggregate concrete under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*. 2020; 251:118957. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118957

2. Tu H., Zhou H., Lu J., Gao Y., Shi L. Elastoplastic coupling analysis of high-strength concrete based on tests and the Mohr-Coulomb criterion. *Construction and Building Materials*. 2020; 255:119375. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119375

3. Zhao L., Zhang L., Mao J., Liu Z. An elastoplastic damage model of concrete under cyclic loading and its numerical implementation. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 273:108714. DOI: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2022.108714

4. Lu D., Su C., Zhou X., Wang G., Du X. A cohesion-friction combined hardening plastic model of concrete with the nonorthogonal flow rule: Theory and numerical implementation. *Construction and Building Materials*. 2022; 325:126586. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126586

5. Wang G., Lu D., Zhou X., Wu Y., Du X., Xiao Y. A stress-path-independent damage variable for concrete under multiaxial stress conditions. *International Journal of Solids and Structures*. 2020; 206:59-74. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2020.09.012

6. Lu D.X., Nguyen N.H.T., Bui H.H. A cohesive viscoelastic-elastoplastic-damage model for DEM and its applications to predict the rate- and time-dependent behaviour of asphalt concretes. *International Journal of Plasticity*. 2022; 157:103391. DOI: 10.1016/J.IJPLAS.2022.103391

7. Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Yu., Nedoresov A.V. Modern strength criteria for concrete under triaxial stress states. *Building and Reconstruction*. 2021; 5(97):16-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30. EDN HYNCLS. (rus.).

8. Panfilov D.A., Pischulev A.A., Gimadetdinov K.I. Review of diagrams of concrete deformation under compression in national and foreign concrete codes. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 3:80-84. EDN RYGLKB. (rus.).

9. Rimshin V.I., Krishan A.L., Mukhametzaynov A.I. Constructing a deformation diagram of uniaxially compressed concrete. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 6:23-31. EDN TYCWVB. (rus.).
10. Murashkin V.G. About application of concrete deformation models in reconstruction. *Expert: Theory and Practice*. 2022; 4(19):41-44. DOI: 10.51608/26867818_2022_4_41. EDN YODXVE. (rus.).
11. Treschev A.A., Zakharova I.A., Sudakova I.A. Selection of diagrams for deformation of composite materials and more. *Expert: Theory and Practice*. 2022; 2(17):81-90. DOI: 10.51608/26867818_2022_2_81. EDN DJPYVA. (rus.).
12. Berg O.L. *Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1962; 96. (rus.).
13. Gvozdev A.A. *On the redistribution of forces in statically indeterminate reinforced concrete conventional and prestressed structures*. Moscow, Gosstroyizdat, 1955; 127. (rus.).
14. Kholmyanskiy M.M., Kogan Ye.A. On the strength and crack resistance of standardized concrete under non-uniform tension with control of deformations and forces. *Limit states of concrete and reinforced concrete structures: materials of conferences and meetings on hydraulic engineering*. 1982; 202-205. (rus.).
15. Bondarenko V.M. *Some issues of nonlinear theory of reinforced concrete*. Khar'kov, 1968; 324. (rus.).
16. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Karpenko S.N., Kadiev D.Z. On the construction of the diagram of calculation method of rod structures under the action of low negative temperatures. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 6(714):5-17. EDN AJBMUG. (rus.).
17. Eryshev V.A., Toshin D.S. Concrete deformation diagram under repeated few loads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2005; 10(562):109-114. EDN PFAKVN. (rus.).
18. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Concrete Technologies*. 2013; 10(87):34-36. EDN SYTIYL. (rus.).
19. Radaikin O. Comparative analysis of various diagrams of concrete deformation according to the criterion of energy consumption for deformation and destruction. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; 10:29-39. DOI: 10.34031/article_5db33945315bb4.76965991. EDN MPQNBL. (rus.).
20. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Sorokin E.V. Analytical description of concrete deformation diagrams for the calculation of plastic surfaces from nonlinearly deformable material. *Building and Reconstruction*. 2018; 3(77):22-30. EDN OVHMHN. (rus.).
21. Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Stress-strain model for concrete confined by a discrete FRP-jackets. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 8:43-53. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.43-53. EDN JSBMLZ. (rus.).
22. Adishchev V.V., Berezina E.V., Yershova N.V. Experimental testing of the method for transforming reference diagrams of concrete deformation under bending. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2011; 8-9(632-633):118-124. EDN OZNFUR. (rus.).
23. Murashkin V., Murashkin G. Application of concrete deformation model for calculation of bearing capacity of reinforced concrete structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04008. DOI: 10.1051/mateconf/201819604008
24. Geniyev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Theory of Plasticity of Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 316. (rus.).
25. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The Limiting Values of Moments And Deformations Ratio in Strength Calculations Using Specified Material Diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:032024. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032024
26. Gvozdev A.A. Strength of concrete under biaxial stress state. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1974; 7:10-11. (rus.).

Received January 13, 2025.

Adopted in revised form on March 25, 2025.

Approved for publication on March 26, 2025.

BIONOTES: **Ngoc Tuyen Vu** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Fundamental Education; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2566-4260; ID RSCI: 832264, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; WuNgokTuen@gic.mgsu.ru;

Evgenia N. Polyakova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; evgeniapolyakova256@gmail.com.

Contribution of the authors:

Ngoc Tuyen Vu — scientific guidance, conceptualization, curation of data and preparation of the initial draft.

Evgenia N. Polyakova — methodology, formal analysis, initial draft preparation, visualization.

The authors declare no conflicts of interest.

Обобщенные параметры композитных мембранных конструкций

Александр Романович Туснин, Екатерина Константиновна Грачева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Знание ключевых параметров, определяющих работу несущих систем, позволяет обеспечить безопасную, рациональную и экономичную эксплуатацию зданий и сооружений. Для мембранных систем с размещенным на мембране бетонным слоем определены относительные обобщенные параметры, определяющие работу композитных мембранных конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрены мембранные системы с прямолинейным опорным контуром, жестко закрепленным на опорах, и прикрепленной к нему плоской стальной мембраной. Расчеты выполнены для конструкции двух размеров в плане. Первая: $a = b = 6$ м с толщиной мембраны 1 и 2 мм. Вторая: $a = b = 12$ м с толщиной мембраны 2 и 3 мм. На мембрану уложен слой бетона В30, равный для первой модели 50 и 40 мм, для второй 100 и 60 мм. Конструкция по свободному краю мембраны нагружена нагрузкой q , действующей в плоскости мембраны.

Результаты. Численные расчеты, проведенные с использованием метода конечных элементов, показали, что увеличение относительной продольной жесткости бетонного слоя приводит к снижению изгибающего момента, продольных усилий в контуре и напряжений в мембране. Это увеличивает жесткость и несущую способность конструкции. Установлено, что путем изменения параметров жесткости бетонного слоя можно значительно повысить эффективность конструкции.

Выводы. Размещение на мембране бетонного слоя значительно повышает эксплуатационную надежность конструкции, уменьшает усилия в опорном контуре, снижает прогибы и напряжения в мембране. Относительные обобщенные параметры мембранных систем с бетонным слоем можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния провисающих мембранных покрытий на прямоугольном плане с плоским опорным контуром.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мембранные конструкции, опорный контур, относительная продольная жесткость бетонного слоя, изгибная жесткость, продольная жесткость, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Грачева Е.К. Обобщенные параметры композитных мембранных конструкций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 694–708. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.694-708

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Константиновна Грачева, ketrincat1@yandex.ru.

Generalized parameters of composite membrane structures

Aleksandr R. Tusnin, Ekaterina K. Gracheva

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

ABSTRACT

Introduction. Knowledge of the key parameters that determine the operation of load-bearing systems makes it possible to ensure safe, rational and economical operation of buildings and structures. The paper defines the relative generalized parameters that determine the operation of composite membrane structures for membrane systems with a concrete layer placed on the membrane.

Materials and methods. Membrane systems with a rectilinear support contour rigidly fixed on supports and a flat steel membrane attached to it are considered. The calculations were performed for the construction of two dimensions in the plan. The first one is: $a = b = 6$ m with a membrane thickness of 1 and 2 mm. The second one is: $a = b = 12$ m with a membrane thickness of 2 and 3 mm. A layer of concrete B30 is laid on the membrane, equal to 50 and 40 mm for the first model, and 100 and 60 mm for the second. The structure along the free edge of the membrane is loaded with a load q acting in the plane of the membrane.

Results. Numerical calculations performed using the finite element method have shown that an increase in the relative longitudinal stiffness of the concrete layer leads to a decrease in bending moment, longitudinal forces in the contour and stresses in the membrane. This increases the rigidity and load-bearing capacity of the structure. It was found that by changing the stiffness parameters of the concrete layer, the efficiency of the structure can be significantly improved.

Conclusions. The placement of a concrete layer on the membrane significantly increases the operational reliability of the structure, reduces forces in the support circuit, and reduces deflections and stresses in the membrane. The relative generalized parameters of membrane systems with a concrete layer can be used to assess the stress-strain state of sagging membrane coatings on a rectangular plan with a flat support contour.

KEYWORDS: membrane structures, support contour, relative longitudinal stiffness of the concrete layer, bending stiffness, longitudinal stiffness, finite element method

FOR CITATION: Tusnin A.R., Gracheva E.K. Generalized parameters of composite membrane structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):694-708. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.694-708 (rus.).

Corresponding author: Ekaterina K. Gracheva, ketrincat1@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Мембранные конструкции — это несущие системы, образованные опорным контуром и пролетной частью в виде металлической мембраны (тонколистовой оболочки). В отличие от традиционных решений, мембранные конструкции обеспечивают минимальный вес и строительную высоту покрытия при высокой прочности и долговечности¹ [1]. Они позволяют создавать легкие, экономичные и выразительные покрытия больших пролетов. Такие конструкции находят широкое применение в спортивных сооружениях, выставочных центрах, транспортной инфраструктуре и других объектах с большими общественными пространствами. Мембранные конструкции могут иметь круглый, овальный или прямоугольный план и выполняются из стали или алюминиевых сплавов, демонстрируют высокую эффективность за счет рационального распределения усилий и использования возможностей современных материалов² [2].

В России накоплен большой опыт проектирования, строительства и эксплуатации большепролетных мембранных покрытий³ [3, 4]. Основы расчета и проектирования мембранных покрытий заложены российскими учеными, что дало возможность построить ряд уникальных зданий и сооружений [5, 6].

Помимо уникальных, мембранные покрытия успешно используются в зданиях различного, в том числе и массового, применения [7–9]. Проведены исследования мембранных покрытий пролетами 12–36 м [10–12], которые показали возможность использования мембранных конструкций в качестве покрытий зданий с обычными пролетами. Несмотря на очевидные преимущества, применение мембранных конструкций в России пока остается ограниченным, так как обычно в качестве области их использования рассматриваются прежде всего большепролетные сооружения. Покрытия пролетами меньше 30–36 м обычно выполняются с помо-

щью традиционных железобетонных или металлических конструкций, что связано как с недостатком нормативной базы, так и с отсутствием унифицированных проектных решений [13].

В настоящее время методика экспериментальных и теоретических исследований мембранных конструкций хорошо отработана⁴. Это позволяет решать сложные задачи по применению различных типов мембранных конструкций при действии статических [14] и динамических [15, 16] нагрузок. Кроме металлических мембран находят применение мембранные системы с использованием тканевых мембранных материалов [17], для которых, кроме несущей способности, изучаются вопросы потерь тепла при использовании светопрозрачных тканевых материалов [18].

Российскими учеными исследовались и внедрялись в практику строительства висячие железобетонные оболочки с внешним листовым армированием [19, 20]. Эти системы представляют собой провисающие покрытия, у которых мембрана закреплена на податливом опорном контуре. На мембрану после монтажа покрытия в проектное положение, как на несъемную опалубку, укладывается бетон, который после набора прочности формирует оболочку переменной толщины. При действии на покрытие расчетной нагрузки мембрана растягивается, а бетонная оболочка будет работать на сжатие и изгиб. Сформированная таким образом несущая система является сталежелезобетонной или композитной конструкцией, в которой максимально полно используются особенности работы образующих ее материалов. Такие покрытия по сравнению с металлическими мембранными системами обладают увеличенным собственным весом при повышенной жесткости и несущей способности.

В НИУ МГСУ сейчас разрабатывается композитная мембранная конструкция для применения в качестве перекрытий многоэтажных зданий со стальным каркасом. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования [21] подтвердили работоспособность подобных систем. Представляет значительный научный и практический интерес изучение зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) композитных мембранных конструкций от их основных геометрических и жесткостных параметров.

⁴ Рекомендации по проектированию и применению железобетонных (с внешним листовым армированием) висячих покрытий при реконструкции предприятий без остановки производства. М., 1984. 32 с.

¹ Еремеев П.Г. Пространственные тонколистовые металлические конструкции покрытий. М. : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2006. 560 с.

² Мембранные конструкции зданий и сооружений. В 2 ч. / ЦНИИ строит. конструкций им. В.А. Кучеренко; под общ. ред. В.И. Трофимова, П.Г. Еремеева. М. : Стройиздат, 1990. 445 с.

³ Рекомендации по проектированию мембранных покрытий на прямоугольном плане для реконструируемых зданий и сооружений. 2-е изд. исправ. и доп. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1989. 90 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим мембранную систему с прямолинейным опорным контуром, жестко закрепленным на опорах, и прикрепленной к нему плоской стальной мембраной. На мембрану уложен слой бетона, который за счет работы на сжатие способен воспринимать часть цепных усилий в мембране, перпендикулярных контуру и передаваемых на него. Конструкция по свободному краю мембраны нагружена нагрузкой q , действующей в плоскости мембраны. На рис. 1 показана простая мембранная модель.

Изгибная жесткость контура — $(EI)_k$, продольная жесткость — $(EA)_k$. Пролет опорного контура — $2a$, ширина мембраны — a , толщина — t , модуль упругости — E . Кроме мембраны в состав конструкции включена бетонная плита толщиной t_b , модуль упругости E_b . На рис. 1 приведена исследуемая схема.

Мембрана жестко крепится к опорному контуру. Железобетонный слой крепится к опорному контуру с возможностью восприятия только сжимающих усилий, передаваемых с опорного контура на железобетон. По свободной стороне на бетонный слой наложены связи в направлении оси Y . При исследовании принято, что силы трения между мембраной и бетонным слоем отсутствуют.

Ранее установлено [3], что из-за изгиба контура происходит перераспределение усилий в мембране и на контур действует неравномерная нагрузка, суммарно равная действию равномерно распределенной нагрузки q на свободный край мембраны. Диф-

ференциальное уравнение изогнутой оси опорного контура имеет вид:

$$(EI)_k \frac{\delta^4 v}{\delta x^4} - N_y + N_b = 0, \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned} N_y &= \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta v}{\delta y} + \mu \frac{\delta u}{\delta x} \right); \\ N_{yb} &= \frac{E_b t_b}{1-\mu_b^2} \left(\frac{\delta v}{\delta y} + \mu_b \frac{\delta u}{\delta x} \right), \end{aligned} \tag{2}$$

N_y и N_{yb} — распределенные в мембране и бетонном слое усилия нормальные к контуру по линии контакта мембраны с опорным контуром. Разные знаки этих усилий означают, что цепные усилия в мембране изгибают опорный контур, а отпор бетонного слоя препятствует изгибу контура.

В выражениях (1) и (2) $(EI)_k$ — жесткость контура на изгиб в плоскости мембраны; E и t — модуль упругости и толщина мембраны; E_b и t_b — модуль упругости и толщина бетонного слоя; μ — коэффициент Пуассона для мембраны; μ_b — коэффициент Пуассона для бетонного слоя; u и v — перемещения кромки мембраны, параллельные осям X и Y соответственно.

Введем безразмерные параметры конструкции [3]:

$$\bar{u} = ua/t^2; \bar{v} = va/t^2; \xi = x/a; \eta = y/a.$$

С учетом принятых относительных параметров координаты и перемещения можно представить в виде выражений:

$$u = \bar{u} t^2/a; v = \bar{v} t^2/a; x = \xi a; y = \eta a.$$

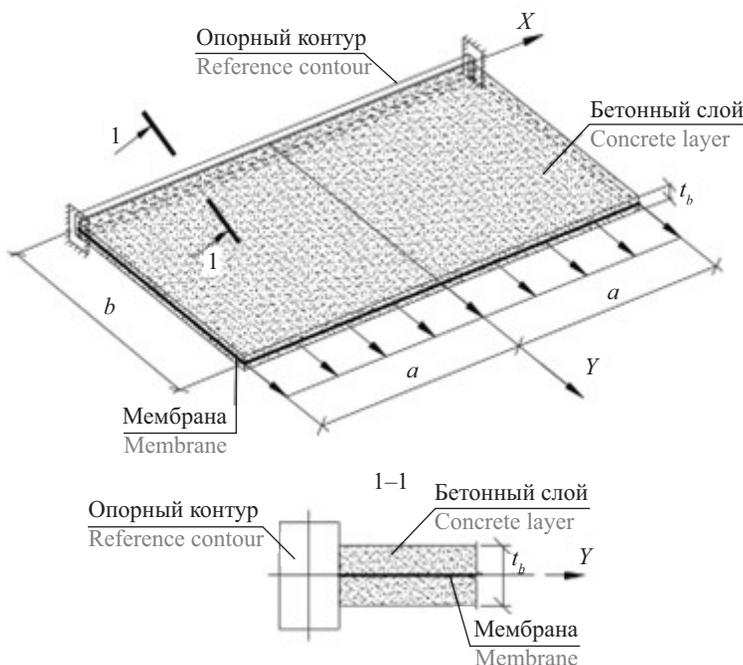


Рис. 1. Схема простой мембранной модели

Fig. 1. Diagram of a simple membrane model

Подставив выраженные через безразмерные параметры перемещения и координаты в формулы (1) и (2), получим:

$$(EI)_k \frac{t^2}{a} \frac{\delta^4 \bar{v}}{a^4 \delta \xi^4} - N_y + N_b = 0; \quad (3)$$

$$N_y = \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \eta} + \mu \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \xi} \right), \quad (4)$$

$$N_{yb} = \frac{E_b t_b}{1-\mu_b^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \eta} + \mu_b \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \xi} \right).$$

Подставив в формулу (3) выражения для цепных усилий в мембране и отпора бетонного слоя (4), получим:

$$(EI)_k \frac{t^2}{a} \frac{\delta^4 \bar{v}}{a^4 \delta \xi^4} - \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \eta} + \mu \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \xi} \right) + \frac{E_b t_b}{1-\mu_b^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \eta} + \mu_b \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \xi} \right) = 0. \quad (5)$$

Поделив выражение (5) на $\frac{Et t^2}{a}$, получим:

$$\frac{(EI)_k}{Eta^3} \frac{\delta^4 \bar{v}}{\delta \xi^4} - \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \eta} + \mu \frac{\delta \bar{u}}{\delta \xi} \right) + \frac{E_b t_b}{Et(1-\mu_b^2)} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \eta} + \mu_b \frac{\delta \bar{u}}{\delta \xi} \right) = 0. \quad (6)$$

Обозначим:

$$\bar{n} = \frac{(EI)_k}{Eta^3} \text{ — относительная изгибная жесткость контура;} \quad (7)$$

$$\bar{g} = \frac{E_b t_b}{Et} \text{ — относительная продольная жесткость бетонного слоя.} \quad (8)$$

После подстановки выражений (7) и (8) в (6) получим следующую зависимость работы контура на изгиб с учетом передачи нагрузки на него растянутой мембраной при наличии отпора бетонного слоя, уложенного на мембрану:

$$\bar{n} \frac{\delta^4 \bar{v}}{\delta \xi^4} - \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \eta} + \mu \frac{\delta \bar{u}}{\delta \xi} \right) + \frac{\bar{g}}{1-\mu_b^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \eta} + \mu_b \frac{\delta \bar{u}}{\delta \xi} \right) = 0. \quad (9)$$

Таким образом, для системы, образованной опорным контуром, мембраной и уложенным на мембрану бетонным слоем, определяющими параметрами являются пролет конструкции, изгибная жесткость контура, продольные жесткости мембраны и бетонного слоя. Установлено, что можно сформировать из указанных параметров обобщенные величины: относительную изгибную жесткость и относительную продольную жесткость бетонного слоя.

В мембране по линии ее крепления к изгибаемому контуру возникают касательные усилия, действующие вдоль продольной оси контура и ведущие к сжатию контура. Дифференциальное уравнение сжатого контура имеет вид:

$$(EA)_k \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} - N_{xy} = 0, \quad (10)$$

$$\text{где } N_{xy} = \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) + \frac{E_b t_b}{1-\mu_b^2} \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right), \quad (11)$$

N_{xy} — касательные погонные усилия в мембране и бетонном слое по линии их соединения с контуром. Погонные усилия действуют вдоль оси контура.

Подставив в выражение (10) (11) и трансформировав его с использованием относительных перемещений и координат, получим:

$$(EA)_k \frac{t^2}{a} \frac{\delta^2 \bar{v}}{a^2 \delta \xi^2} - \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \xi} + \mu \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \eta} \right) - \frac{E_b t_b}{1-\mu_b^2} \left(\frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{v}}{a \delta \xi} + \mu_b \frac{t^2}{a} \frac{\delta \bar{u}}{a \delta \eta} \right) = 0. \quad (12)$$

Поделив выражение (12) на $\frac{Et t^2}{a}$, получим:

$$\frac{(EA)_k}{Eta} \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta \xi^2} - \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \xi} + \frac{\delta \bar{u}}{\delta \eta} \right) - \frac{E_b t_b}{Et(1-\mu_b^2)} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \xi} + \frac{\delta \bar{u}}{\delta \eta} \right) = 0. \quad (13)$$

Обозначим:

$$\bar{k} = \frac{(EA)_k}{Eta} \text{ — относительная продольная жесткость контура.} \quad (14)$$

После подстановки формул (14) и (8) в (13) получим следующую зависимость работы контура на сжатие с учетом передачи нагрузки на него растянутой мембраной при наличии отпора бетонного слоя, уложенного на мембрану:

$$\bar{k} \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta \xi^2} - \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \xi} + \frac{\delta \bar{u}}{\delta \eta} \right) + \frac{\bar{g}}{1-\mu_b^2} \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta \xi} + \frac{\delta \bar{u}}{\delta \eta} \right) = 0. \quad (15)$$

Следовательно, кроме параметров конструкции, определяющих изгиб контура, влияют на работу контура будет и его продольная жесткость.

Уравнения (9) и (15) записаны в относительном виде. Поэтому можно ожидать, что в разных по абсолютным параметрам мембранных конструкциях с бетонным слоем на мембране при одинаковых относительных параметрах \bar{k} , \bar{n} , \bar{g} перемещения и усилия можно получить с учетом поправочных коэффициентов, зависящих от относительных параметров.

Табл. 1. Геометрические характеристики, толщина мембраны и бетонного слоя рассматриваемых мембранных моделей
 Table 1. Geometric characteristics, thickness of membrane and concrete layer, considered membrane models

Параметры Parameters	1-й вариант 1 option		2-й вариант 2 option	
	$a, \text{ м}$ m	6	12	6
$t, \text{ м}$ m	0,001	0,002	0,002	0,003
$t_b, \text{ м}$ m	0,05	0,1	0,04	0,060
$E, \text{ МПа}$ MPa	206 000	206 000	206 000	206 000
$E_b, \text{ МПа}$ MPa	32 500	32 500	32 500	32 500
$(EA)_k, \text{ кН}$ kN	618 000	2 472 000	2 472 000	7 416 000
$(ED)_k, \text{ кН} \cdot \text{ м}^2$ $\text{kN} \cdot \text{ m}^2$	4450	71 194	17 798	213 581
\bar{k}	0,5		1,0	
\bar{n}	0,0001		0,0002	
\bar{g}	7,89		3,16	

Для определения усилий и перемещений используем следующие соотношения:

- момента на опоре контура $M_{\text{он}} = \alpha_1 \bar{n} p a^2 / 8$;
- момента в пролете контура $M_{\text{пр}} = \alpha_2 \bar{n} p a^2 / 8$;
- продольного усилия на опоре контура $N_{\text{он}} = \alpha_3 \bar{n} p a$;
- продольного усилия в пролете контура $N_{\text{пр}} = \alpha_4 \bar{n} p a$;
- нормальные напряжения в мембране, перпендикулярные оси контура на опоре опорного контура $\sigma_{\text{он}} = \beta_1 p / t$;
- нормальные напряжения в мембране, перпендикулярные оси контура в пролете опорного контура $\sigma_{\text{пр}} = \beta_2 p / t$;
- максимальные касательные напряжения в мембране $\tau_{\text{max}} = \beta_3 p / t$;
- максимальные прогибы контура $v_{\text{max}} = \gamma \bar{n} p \times a^4 / (EI)_k$.

Усилия в контуре, напряжения в мембране и прогибы контура зависят от абсолютных параметров конструкции и поправочных коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma$. Предполагается, что поправочные коэффициенты зависят только от относительных параметров конструкции. Применение обобщенных параметров $\bar{k}, \bar{n}, \bar{g}$ для анализа НДС мембранных конструкций с железобетонным слоем возможно, если для мембранных систем с разными абсолютными, но одинаковыми относительными обобщенными параметрами поправочные коэффициенты в зависимостях для определения усилий, напряжений и прогибов будут совпадать.

С целью оценки возможности использования выявленных относительных параметров для изучения НДС мембранной системы с железобетонным слоем выполнены численные исследования. Это

позволило проверить возможность использования обобщенных относительных параметров для расчета мембранных систем с железобетонным слоем.

Расчеты проведены для конструкции двух размеров в плане. Первая: $a = b = 6$ м с толщиной мембраны 1 и 2 мм. Вторая: $a = b = 12$ м с толщиной мембраны 2 и 3 мм. Мембрана крепится к стальному опорному контуру. На мембрану уложен слой бетона В30, равный для первой модели 50 и 40 мм, для второй 100 и 60 мм. К противоположной стороне мембраны приложена распределенная нагрузка, равная для первой конструкции 100 кН/м, для второй 200 кН/м.

Размеры мембранных моделей, жесткостные параметры контура, толщина мембраны и слоя бетона подобраны так, чтобы при разных абсолютных параметрах относительные параметры конструкций были одинаковы. Рассмотрено два варианта относительных параметров:

- 1-й вариант: $\bar{k} = 0,5; \bar{n} = 0,0001; \bar{g} = 7,89$;
- 2-й вариант: $\bar{k} = 1,0; \bar{n} = 0,0002; \bar{g} = 3,16$.

В табл. 1 представлены параметры рассматриваемых конструкций, соответствующие указанным вариантам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты выполнены с применением вычислительного комплекса Лира в линейной постановке. Для моделирования опорного контура использованы стержневые конечные элементы (КЭ). Мембрана моделируется четырехугольными КЭ оболочки, работающими только на растяжение, сжатие и сдвиг. Бетонный слой моделируется КЭ оболочки, испытывающими, кроме продольных и сдвиговых дефор-

маций, еще и деформации изгиба. Мембрана в конечно-элементной модели (КЭМ) непосредственно крепится к контуру.

Бетонный слой разделен на две части по толщине. Одна часть бетона толщиной, равной половине толщины бетонного слоя, размещается над мембраной на расстоянии, равном четверти толщины бетонного слоя. Вторая часть располагается под мембраной симметрично первой. Обе бетонных части соединяются с мембраной в узлах стержнями, имеющими только продольную жесткость. Взаимодействие бетонного слоя с контуром моделируется стержневыми КЭ, имеющими большую продольную жесткость и большую изгибную жесткость в плоскости, перпендикулярной оси контура. Изгибная жесткость в плоскости, параллельной оси контура, и жесткость на кручение нулевые. Это позволяет обеспечить взаимодействие контура и бетонного слоя только в направлении нормальном оси контура.

Мембранная модель имеет следующие закрепления: расположенные по оси Y узлы закреплены в направлении от линейных перемещений по оси X . На концы опорного контура наложены связи по осям Y и Z , а также трем углам поворота. На свободный край бетонного слоя наложены связи на линейные перемещения по осям Y и Z .

Сетка разбиения мембранной модели 30×15 . К свободному краю мембраны приложена равномерно распределенная нагрузка q . На рис. 2 показана КЭМ исследуемой мембранной конструкции.

На рис. 3 представлены эпюры изгибающих моментов и продольных сил в опорном контуре, на рис. 4 — изополя нормальных напряжений, перпендикулярных оси контура, и касательных напряжений в мембране для мембранной модели размером 12×6 м, выполненной по 1-му варианту относительных параметров.

Результаты проведенных численных расчетов представлены в табл. 2.

Жирным шрифтом в табл. 2 выделены поправочные коэффициенты, используемые при определении усилий в контуре, напряжений в мембране и прогибов контура. Для большинства параметров поправочные коэффициенты при одинаковых относительных параметрах совпадают и не зависят от абсолютных параметров рассчитываемой конструкции. Следовательно, установленные ранее зависимости для относительных параметров справедливы и их можно применять для оценки НДС мембранных систем с бетонным слоем, размещенным на мембране.

Ранее было установлено влияние на работу мембранных конструкций относительных жесткостей опорного контура [3]. Представляет значительный интерес изучение влияния на работу конструкции бетонного слоя. Для этого проведено исследование зависимости НДС мембранной модели от относительной продольной жесткости бетонного слоя. Численные расчеты проведены для модели размерами 12×6 м с мембраной толщиной 1 мм при $\bar{k} = 0,5$, $\bar{n} = 0,0001$. Модель загружена в плоскости мембраны равномерно распределенной нагрузкой 100 кН/м, приложенной к свободному краю мембраны. Жесткости опорного контура и толщина слоя бетона В30 на мембране варьировались в диапазоне от 5 до 100 мм. В табл. 3 приведены параметры НДС мембранной модели в зависимости от относительной продольной жесткости бетонного слоя.

На рис. 5 приведены эпюры усилий в опорном контуре и нормальные напряжения в мембране. С учетом симметрии системы все параметры представлены для левой половины конструкции.

Анализ зависимости НДС конструкции от относительных параметров мембранной модели показал, что при увеличении относительной продольной

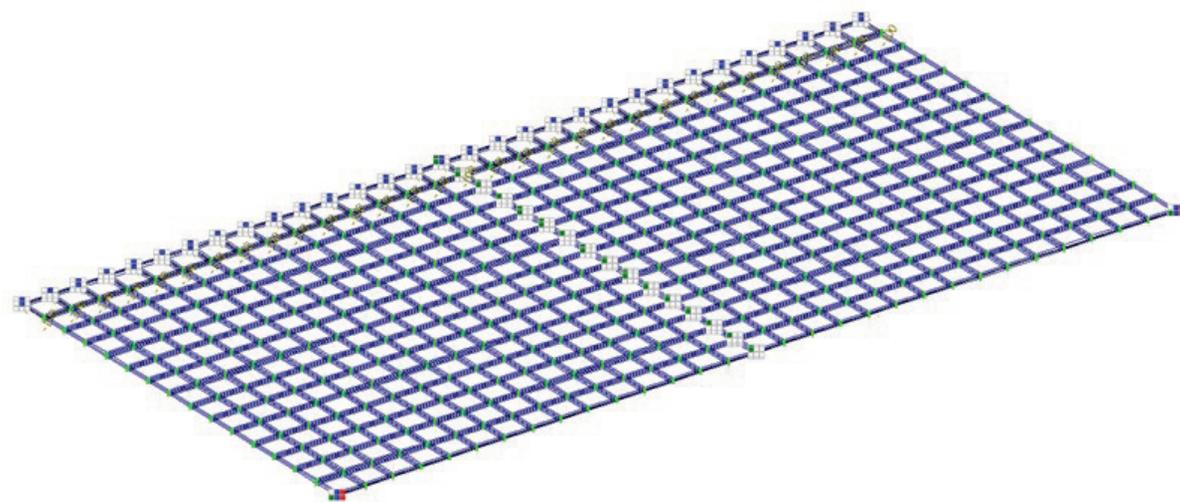


Рис. 2. Конечно-элементная модель исследуемой мембранной конструкции

Fig. 2. Finite element model of the membrane structure under study

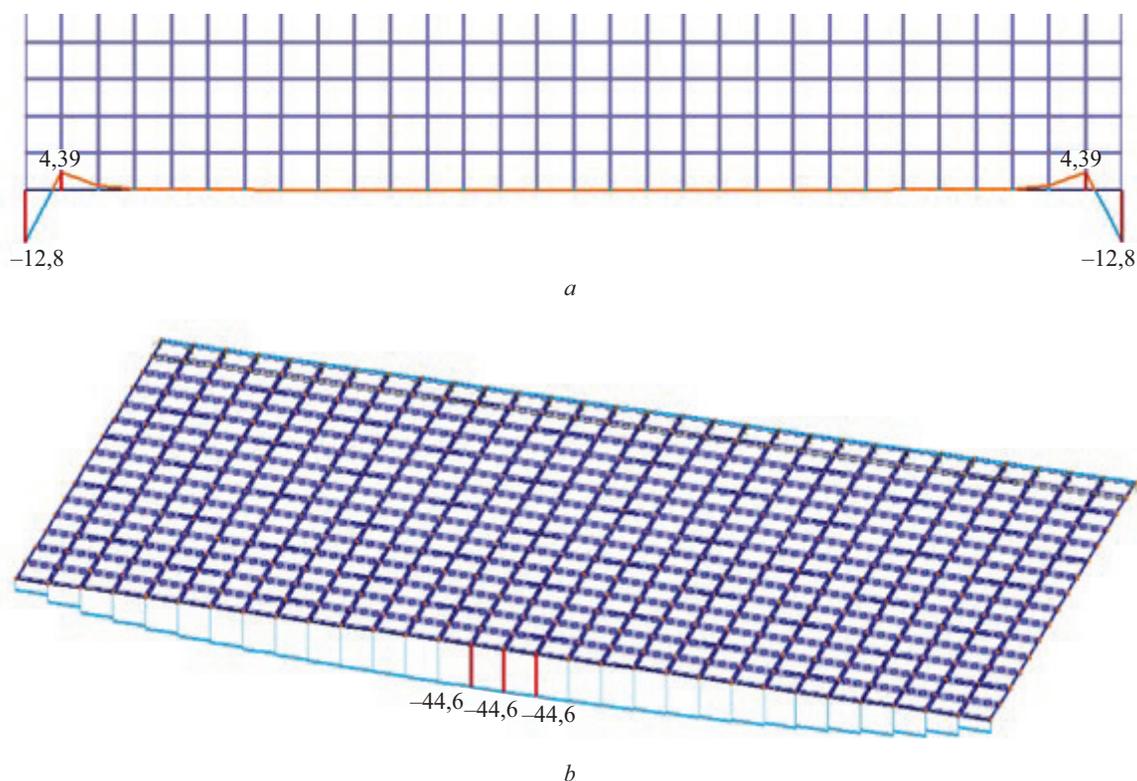
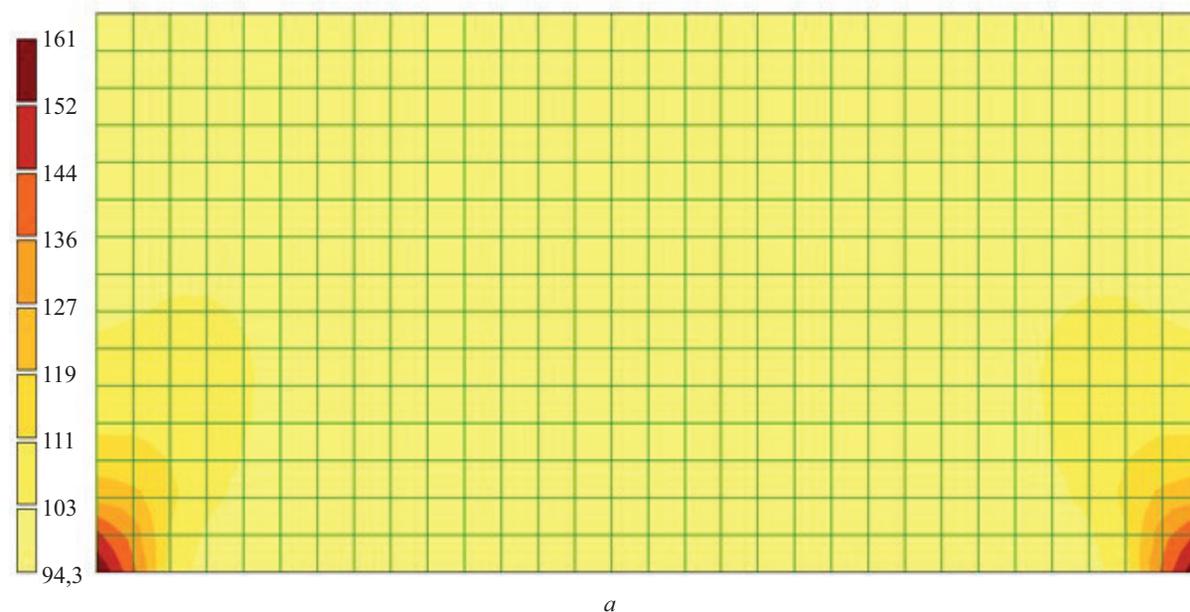


Рис. 3. Эпюры усилий в опорном контуре мембранной модели 12×6 м с толщиной мембраны 1 мм и слоем бетона В30 50 мм, $\bar{k} = 0,5$; $\bar{n} = 0,0001$; $\bar{g} = 7,89$: *a* — изгибающие моменты, кН·м; *b* — продольные усилия, кН

Fig. 3. Force diagrams in the support contour of a 12×6 m membrane model with a membrane thickness of 1 mm and a concrete layer of 50 mm, $\bar{k} = 0.5$; $\bar{n} = 0.0001$; $\bar{g} = 7.89$: *a* — bending moments, kN·m; *b* — longitudinal forces, kN

жесткости бетонного слоя уменьшаются изгибающие моменты, продольные усилия и нормальные напряжения на опоре и в середине контура. Качественно изменение НДС похоже на изменения расчетных параметров при росте относительной изгибной жесткости [3]. Из-за изгиба контура в мембране возникают нормальные растягивающие и касатель-

ные напряжения. Минимальные напряжения действуют в мембране в месте ее крепления к середине опорного контура, максимальные — на опорах. От действия касательных напряжений в опорном контуре появляется продольная сжимающая сила, максимальная в пролете и минимальная на опорах контура. Изгибающий момент качественно похож



a

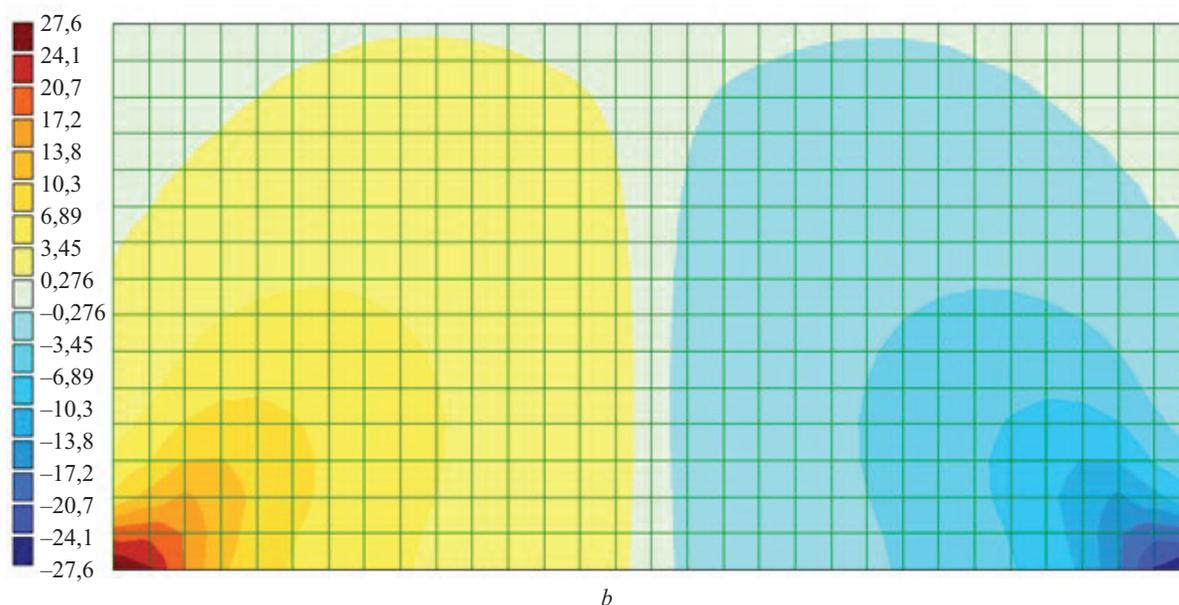


Рис. 4. Напряжения в мембране, МПа, для мембранной модели 12×6 м с толщиной мембраны 1 мм и слоем бетона В30 50 мм, $\bar{k} = 0,5$; $\bar{n} = 0,0001$; $\bar{g} = 7,89$: a — нормальные перпендикулярные оси контура; b — касательные

Fig. 4. Stresses in the membrane, MPa, for a 12×6 m membrane model with a membrane thickness of 1 mm and a concrete layer of 50 mm, $\bar{k} = 0.5$; $\bar{n} = 0.0001$; $\bar{g} = 7.89$: a — normal perpendicular to the contour axis; b — tangential

на момент в балке с заземленными опорами — в середине пролета растянуты волокна со стороны мембраны, на опорах — противоположные волокна. Продольные усилия в пролете больше, чем на опорах контура до 3,8 раза, а моменты на опорах су-

щественно (до 700 раз) превосходят моменты в пролете.

Выявлено отличие в работе мембранной системы с бетонным слоем от обычных мембранных конструкций, обусловленное развитием сжимающих

Табл. 2. Параметры напряженно-деформированного состояния мембранной модели

Table 2. Parameters of the stress-strain state of the membrane model

Параметры Parameters		1-й вариант 1 option		2-й вариант 2 option	
\bar{k}		0,5		1,0	
\bar{n}		0,0001		0,0002	
\bar{g}		7,89		3,16	
a , м / m		6	12	6	12
t , м / m		0,001	0,002	0,002	0,003
t_b , м / m		0,05	0,1	0,04	0,060
q , кН/м / kN/m		100	200	100	200
Изгибающие моменты в контуре Bending moments in the contour	$M_{оп}$, кН·м M_{op} , kN·m	-12,849	-102,79	-33,26	-266,088
	α_1	285,5	285,5	369,6	369,6
	$M_{пр}$, кН·м M_{pr} , kN·m	0,0202	0,162	0,13	1,04
	α_2	0,449	0,450	1,44	1,44
Продольные усилия в контуре Longitudinal forces in the contour	$N_{оп}$, кН N_{op} , kN	-12,212	-48,849	-15,672	-62,689
	α_3	20,353	20,354	13,060	13,060
	$N_{пр}$, кН N_{pr} , kN	-44,604	-178,413	-67,962	-271,849
	α_4	74,34	74,34	56,64	56,64

Параметры Parameters		1-й вариант 1 option		2-й вариант 2 option	
Напряжения в мембране Stresses in the membrane	$\sigma_{оп}$, МПа $\sigma_{оп}$, МПа	161	164	101	134,5
	β_1	1,61	1,64	2,02	2,02
	$\sigma_{пр}$, МПа $\sigma_{пр}$, МПа	94,3	94,3	45	60
	β_2	0,943	0,943	0,9	0,9
	τ_{max} , МПа τ_{max} , МПа	27,6	7,73	-17,33	23,1
	β_3	0,276	0,276	-0,347	0,347
Перемещения контура Contour movements	v_{max} , мм v_{max} , mm	0,355	0,71	0,421	1,121
	γ	0,122	0,122	0,289	0,289

напряжений в бетонном слое в зоне контакта с опорным контуром. При этом за счет включения на сжатие бетонного слоя уменьшаются перемещения кромки мембраны, прикрепленной к контуру, про-

исходит перераспределение цепных усилий с контура на бетонный слой, напряжения в мембране в зоне контакта с опорным контуром возрастают, а усилия в опорном контуре, несмотря на это уменьшаются.

Табл. 3. Параметры напряженно-деформированного состояния мембранной модели в зависимости от относительной продольной жесткости бетонного слоя

Table 3. Parameters of the stress-strain state of the membrane model depending on the relative longitudinal stiffness of the concrete layer

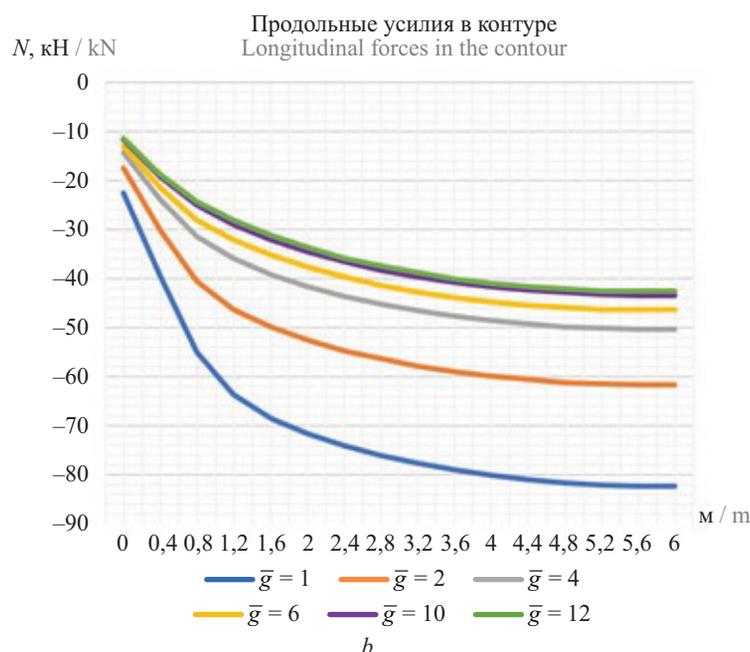
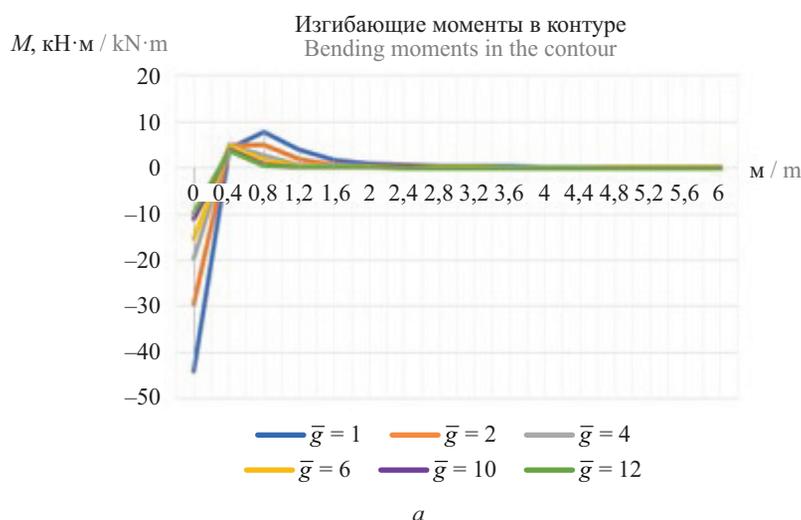
Параметры Parameters	Относительная продольная жесткость бетонного слоя \bar{g} Relative longitudinal stiffness of the concrete layer \bar{g}						
	1,0	2,0	4,0	6,0	7,89	10	12
t_b , м / m	0,00633	0,0127	0,0253	0,038	0,05	0,0634	0,076
$M_{оп}$, кН·м $M_{оп}$, kN·m	-43,966	-29,678	-19,712	-15,33	-12,849	-10,968	-9,681
α_1	977,0	659,5	438,0	340,7	285,5	243,7	215,1
$M_{пр}$, кН·м $M_{пр}$, kN·m	0,236	0,108	0,0474	0,0288	0,0202	0,0155	0,0125
α_2	5,24	2,40	1,05	0,64	0,45	0,34	0,28
$N_{оп}$, кН $N_{оп}$, kN	-22,464	-17,516	-14,257	-12,926	-12,212	-11,694	-11,353
α_3	37,44	29,19	23,76	21,54	20,35	19,49	18,92
$N_{пр}$, кН $N_{пр}$, kN	-82,51	-61,774	-50,333	-46,444	-44,604	-43,388	-42,646
α_4	137,51	102,96	83,89	77,41	74,34	72,31	71,08
$s_{оп}$, МПа $\sigma_{оп}$, МПа	300	229	185,9	169	161	154,5	150,7
β_1	3	2,29	1,86	1,69	1,61	1,55	1,51
$\sigma_{пр}$, МПа $\sigma_{пр}$, МПа	82,3	89,3	92,7	93,9	94,3	94,6	94,8
β_2	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95
τ_{max} , МПа τ_{max} , МПа	62,7	42,1	32,7	29,4	27,6	26,2	25,3
β_3	0,63	0,42	0,33	0,29	0,28	0,26	0,25
v_{max} , мм v_{max} , mm	2,4	1,32	0,687	0,464	0,355	0,281	0,235
γ	0,824	0,453	0,236	0,159	0,122	0,0965	0,0807

Следует отметить, что в отличие от мембранных конструкций без бетонного слоя в рассматриваемой мембранной системе включение в работу бетона ведет к формированию заметных нормальных к оси контура напряжений в пролете мембраны, что является следствием уменьшения горизонтальных перемещений контура. С ростом толщины бетонного слоя происходит снижение нормальных напряжений в мембране на опоре.

Построены графики изменения изгибающих моментов и усилий в опорном контуре, напряжений в мембране и горизонтальных перемещений контура в зависимости от относительно продольной жесткости бетонного слоя. На рис. 6 представлены зависимости изменения расчетных параметров от относительной продольной жесткости бетонного слоя для мембранной модели.

С ростом параметра \bar{g} изгибающие моменты в пролете уменьшаются существенно быстрее,

чем моменты на опоре контура. Моменты в пролете в рассматриваемом диапазоне изменения \bar{g} уменьшаются почти в 19 раз при уменьшении опорных моментов в 4,5 раза. Продольные усилия в контуре уменьшаются с ростом толщины бетонного слоя заметно меньше всего до 2 раз. Нормальные напряжения в мембране по линии крепления к контуру на опоре с ростом жесткости бетонного слоя уменьшаются в 2 раза, а нормальные напряжения в пролете несколько возрастают (на 15 %). Уменьшается разница между максимальными нормальными напряжениями в мембране по линии крепления к опорному контуру. Отношение максимальных нормальных напряжений к минимальным при $\bar{g} = 1$ достигает 3,7 раз, при $\bar{g} = 12$ — 1,6 раза. Касательные напряжения в мембране при изменении относительной продольной жесткости бетона уменьшаются в 2,5 раза. Прогобы контура при этом уменьшаются более чем в 10 раз.



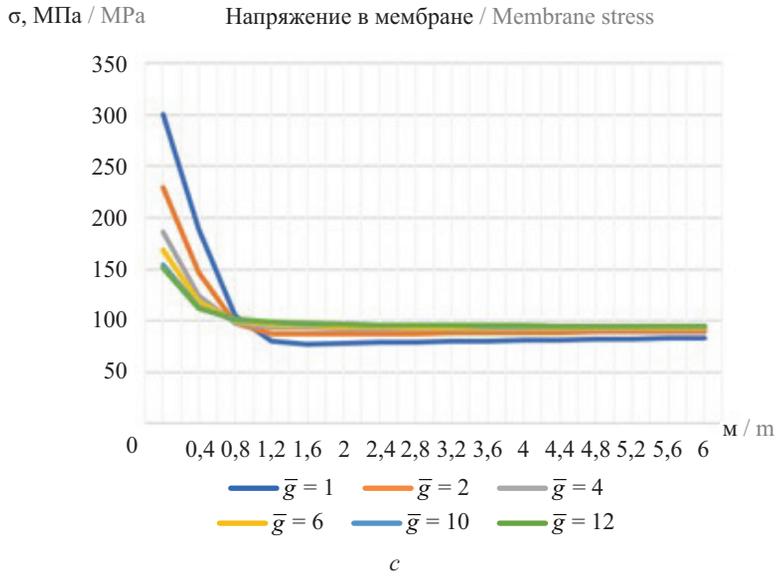
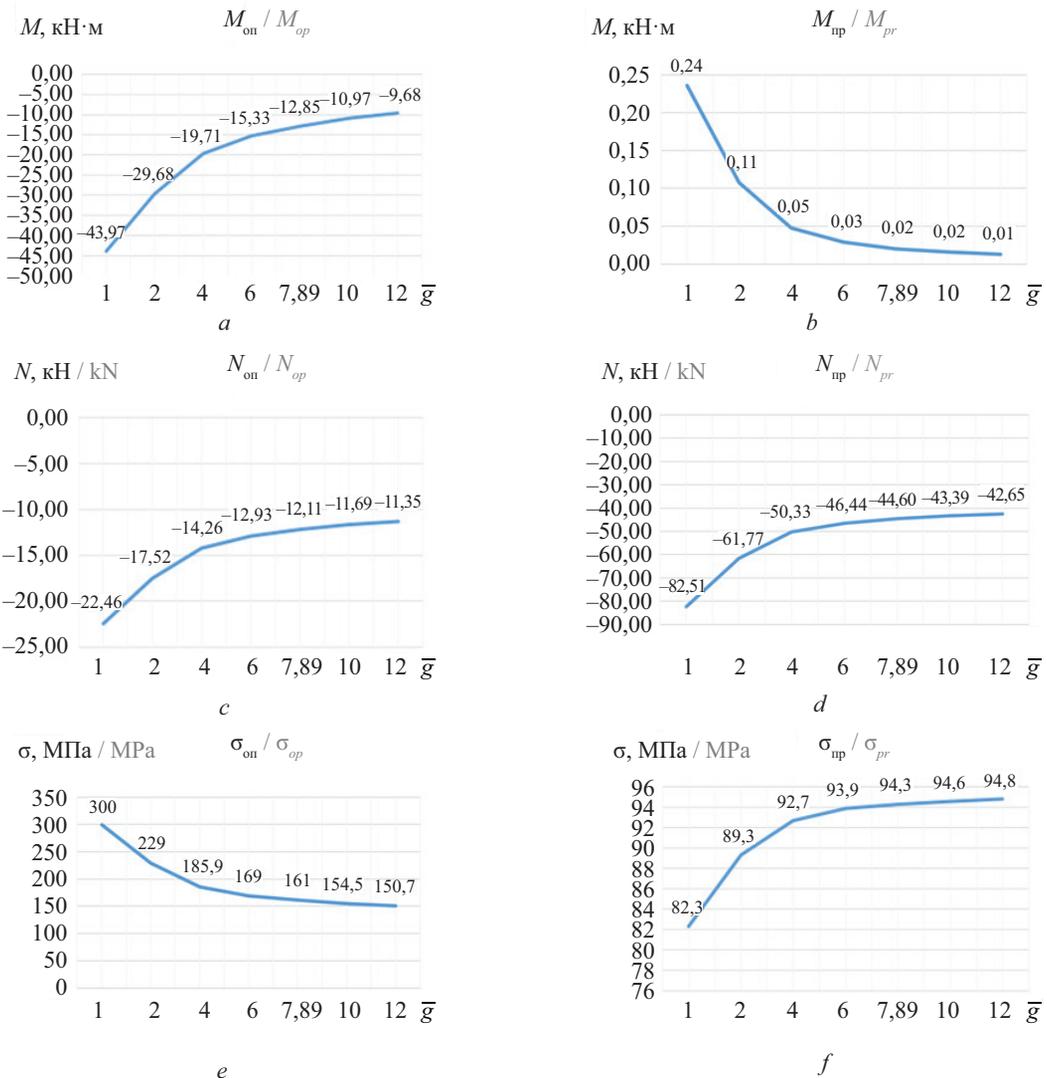


Рис. 5. Эпюры мембранной модели 12×6 м с толщиной мембраны 1 мм, $\bar{k} = 0,5$; $\bar{n} = 0,0001$: а — эпюры изгибающих моментов в контуре; б — эпюры продольных усилий; с — эпюры нормальных напряжений в мембране

Fig. 5. Diagrams of a 12×6 m membrane model with a membrane thickness of 1 mm, $\bar{k} = 0.5$; $\bar{n} = 0.0001$: a — diagrams of bending moments in the contour; b — diagrams of longitudinal forces; c — diagrams of stress in the membrane



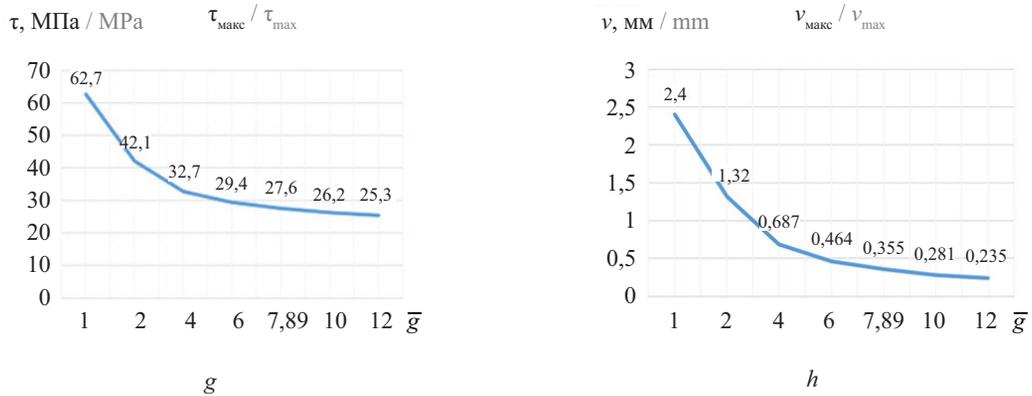


Рис. 6. Зависимости изменения расчетных параметров от относительной продольной жесткости бетонного слоя для мембранной модели 12×6 м с толщиной мембраны 1 мм, $\bar{k} = 0,5$; $\bar{n} = 0,0001$: *a* — изгибающих моментов в контуре на опоре мембраны; *b* — изгибающих моментов в контуре в середине мембраны; *c* — усилий в контуре на опоре мембраны; *d* — усилий в контуре в середине мембраны; *e* — нормальных напряжений на опоре мембраны; *f* — нормальных напряжений в середине мембраны; *g* — максимальных касательных напряжений в мембране; *h* — максимальных горизонтальных перемещений контура мембраны

Fig. 6. Dependences of the calculated parameters on the relative longitudinal stiffness of the concrete layer for a 12×6 m membrane model with a membrane thickness of 1 mm, $\bar{k} = 0.5$; $\bar{n} = 0.0001$: *a* — bending moments in the contour on the membrane support; *b* — bending moments in the contour in the middle of the membrane; *c* — forces in the contour on the support membrane; *d* — forces in the contour in the middle of the membrane; *e* — normal stresses on the membrane support; *f* — normal stresses in the middle of the membrane; *g* — maximum tangential stresses in the membrane; *h* — maximum horizontal displacements of the membrane contour

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные численные исследования подтвердили эффективность включения в состав мембранных конструкций бетонного слоя, размещенного на мембране. Анализ дифференциального уравнения деформирования опорного контура позволил выявить обобщенные параметры: относительные продольную \bar{k} и изгибную жесткости опорного контура \bar{n} , а также относительную продольную жесткость бетонного слоя \bar{g} . Установлена возможность применения относительных обобщенных параметров композитных мембранных конструкций для формирования методики расчета таких систем. Это подтверждается независимостью поправочных коэффициентов, используемых в формулах определения перемещений опорного контура, напряжений в мембране и усилий в контуре от геометрических размеров, жесткостных характеристик, нагрузки. При одинаковых значениях относительных обобщенных параметров поправочные коэффициенты совпадают.

Выявлено значительное влияние относительной продольной жесткости бетонного слоя на деформации распределения усилий в композитной мембранной конструкции. Включение в состав конструкции бетонного слоя повышает жесткость всей системы и способствует более равномерному распределению напряжений в мембране, уменьшает напряжения в мембране, прогибы контура и усилия в нем.

Использование композитных мембранных конструкций в перекрытиях зданий может привести к повышению несущей способностью за счет совместной работы стальной мембраны (на растяжение) и бетонного слоя (на сжатие), снижению прогибов и повышению пространственной жесткости покрытия.

Выявленные обобщенные относительные параметры продольной жесткости \bar{k} , изгибной жесткости \bar{n} , продольной жесткости бетонного слоя \bar{g} позволяют построить методику расчета в виде системы формул с поправочными коэффициентами, зависящими только от относительных обобщенных параметров.

На основании проведенных численных исследований установлены особенности взаимодействия мембраны с податливым опорным контуром при наличии бетонного слоя, размещенного на мембране. Кроме обычно используемых обобщенных параметров (относительных продольной \bar{k} и изгибной \bar{n} жесткостей контура) вводится относительная продольная жесткость бетонного слоя \bar{g} . Выявлена зависимость усилий и перемещений мембранной модели от относительной продольной жесткости бетонного слоя. При изменении параметра \bar{g} в диапазоне от 1 до 12 определено:

- продольные усилия в опорном контуре уменьшаются в 2 раза;
- изгибающие моменты уменьшаются на опоре в 4,5 раза, в пролете до 19 раз;
- нормальные напряжения в мембране по линии крепления к контуру на опоре уменьшаются

в 2 раза, а нормальные напряжения в пролете возрастают на 15 %;

- касательные напряжения в мембране уменьшаются в 2,5 раза;
- прогибы контура уменьшаются более чем в 10 раз.

Размещение на мембране бетонного слоя ведет к существенному уменьшению усилий в опорном

контуре, прогибов контура и напряжений в мембране. В результате этого мембранные конструкции с бетонным слоем обладают более высокой несущей способностью и жесткостью. Установленные относительные параметры мембранных систем с бетонным слоем можно использовать для оценки НДС провисающих композитных мембранных покрытий на прямоугольном плане с плоским опорным контуром.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Еремеев П.Г. Тонколистовые мембраны — новый вид легких металлических конструкций (ЛМК) покрытий // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1992. № 7. С. 14–16. EDN YZHETB.
2. Еремеев П.Г. Тонколистовые металлические мембранные конструкции покрытий: исследования, строительство // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 3 (14). С. 43–57. EDN ZCDGZN.
3. Еремеев П.Г. Влияние податливости опорного контура мембраны на перераспределение в нем усилий // Строительная механика и расчет сооружений. 1984. № 6. С. 71–75. EDN YOXPWX.
4. Фарфель М.И. Мембранные покрытия зданий массового назначения // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 3 (296). С. 37–45. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.3.37.45. EDN ODRAXE.
5. Фарфель М.И. Покрытия из стальных мембран — эффективный тип висячих конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 4 (315). С. 58–67. DOI: 10.37538/00392383.2024.4.58.67. EDN ZOTSNM.
6. Копытова А.Е., Братошевская В.В. Применение тонколистовых конструкций // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по мат. 79-й науч.-практ. конф. студентов по итогам НИР за 2023 год. 2024. С. 202–204. EDN RYWFDT.
7. Фарфель М.И. Численные исследования работы прямоугольных мембранных панелей // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 4 (219). С. 53–62. EDN XTSEZG.
8. Фарфель М.И. Двускатные покрытия из мембранных панелей // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 6. С. 26–28. EDN KNOVPV.
9. Клюев С.В., Ундалов А.М., Сабитов Л.С., Клюев А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов купола с мембранной кровлей // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 6. С. 1–8. EDN YZYIYJ.
10. Chang-Jiang L., Zhou-Lian Z., Xiao-Ting H., Jun-Yi S., Wei-Ju S., Yun-Ping X. L-P Perturbation Solution of Nonlinear Free Vibration of Prestressed Orthotropic Membrane in Large Amplitude // Mathematical Problems in Engineering. 2010. Vol. 2010. Issue 1. DOI: 10.1155/2010/561364
11. Liu C.J., Zheng Z.L., Yang X.Y., Guo J.J. Geometric Nonlinear Vibration Analysis for Pretensioned Rectangular Orthotropic Membrane // International Applied Mechanics. 2018. Vol. 54. Issue 1. Pp. 104–119. DOI: 10.1007/s10778-018-0864-4
12. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Analysis and design of fabric membrane structures : a systematic review on material and structural performance // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 170. P. 108619. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619
13. Tian G., Fan Y., Wang H., Zheng H., Gao M., Liu J. et al. Studies on the thermal optical properties and solar heat gain of thin membrane structure industrial building // Solar Energy. 2021. Vol. 213. Pp. 81–90. DOI: 10.1016/j.solener.2020.10.083
14. Пасюта А.В. Прочность и жесткость прямоугольной в плане висячей железобетонной оболочки с внешним листовым армированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. С. 20.
15. Haonan H., Yaozhi L. Experimental methods and performance of membrane structures : a systematic literature review // International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). 2023. Vol. 11. Pp. 1–11.
16. Pang Y., Qiu G., Gong J. A material model describing the nonlinear biaxial tensile behavior of fabric membrane in precise forming for inflated structures // Structures. 2024. Vol. 70. P. 107884. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107884
17. Xu J., Zhang Y., Fang J., Wang X. Nonlinear mechanical behavior of architectural coated fabric and uncertainty analyses for FE model of tensioned membrane structure // Structures. 2024. Vol. 69. P. 107505. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107505
18. Bedov A.I., Vagapov R.F., Gabitov A.I., Salov A.S. Calculations of 3D Anisotropic Membrane Structures Under Various Conditions of Fixing // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 92–98. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-92-98. EDN OCHNLT.
19. Freijerova N., Krejsa M. Stress analysis of basic shapes of membrane structures // AIP Conference Proceedings. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2019 (ICNAAM-2019). 2020. P. 130009. DOI: 10.1063/5.0026523. EDN VODLHI.

20. Marbaniang A.L., Kabasi S., Ghosh S. Interactive exploration of tensile membrane structures for conceptual and optimal design // *Structures*. 2024. Vol. 60. P. 105983. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105983. EDN QAJPHА.

21. Туснин А.Р., Постарнак М.В. Испытания модели мембранного перекрытия многоэтажных зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 9. С. 26–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI.

Поступила в редакцию 23 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 января 2025 г.

Одобрена для публикации 21 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7034-0713, РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; tusninar@mgsu.ru;

Екатерина Константиновна Грачева — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5824-8160, РИНЦ ID: 1146313, ORCID: 0009-0003-0606-7986; ketrincat1@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Eremeev P.G. Thin-sheet membranes — a new type of lightweight metal structures (LMC) coatings. *Installation and Special Works in Construction*. 1992; 7:14-16. EDN YZHETB. (rus.).

2. Eremeev P.G. Thin sheet metal membrane roofs structures: researches, building. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2017; 3(14):43-57. EDN ZCDGZN. (rus.).

3. Eremeev P.G. The influence of the pliability of the support contour of the membrane on the redistribution of efforts in it. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1984; 6:71-75. EDN YOXPWX. (rus.).

4. Farfel M.I. Membrane coatings for mass-use buildings. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2021; 3(296):37-45. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.3.37.45. EDN ODRAXE. (rus.).

5. Farfel M.I. Steel membrane coatings are an effective type of hanging structures. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2024; 4(315):58-67. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.4.58.67. EDN ZOTSNM. (rus.).

6. Kopytova A.E., Bratoshevskaya V.V. The use of thin-sheet structures. *Scientific support of the agro-industrial complex : collection of articles based on the materials of the 79th scientific and practical conference of students on the results of research for 2023*. 2024; 202-204. EDN RYWFDT. (rus.).

7. Farfel M.I. Numerical studies of rectangular membrane panels. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2008; 4(219):53-62. EDN XTSEZG. (rus.).

8. Farfel M.I. Gable covers made of membrane panels. *Industrial and Civil Engineering*. 2009; 6:26-28. EDN KNOVPV. (rus.).

9. Klyuyev S.V., Undalov A.M., Sabitov L.S., Klyuyev A.V. Investigation of the stress-strain state of dome elements with a membrane roof. *Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"*. 2022; 6:1-8. EDN YZICYJ. (rus.).

10. Chang-Jiang L., Zhou-Lian Z., Xiao-Ting H., Jun-Yi S., Wei-Ju S., Yun-Ping X. L-P Perturbation Solution of Nonlinear Free Vibration of Prestressed Orthotropic Membrane in Large Amplitude. *Mathematical Problems in Engineering*. 2010; 2010(1). DOI: 10.1155/2010/561364

11. Liu C.J., Zheng Z.L., Yang X.Y., Guo J.J. Geometric Nonlinear Vibration Analysis for Pretensioned Rectangular Orthotropic Membrane. *International Applied Mechanics*. 2018; 54(1):104-119. DOI: 10.1007/s10778-018-0864-4

12. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Analysis and design of fabric membrane structures : a systematic review on material and structural performance. *Thin-Walled Structures*. 2022; 170:108619. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619

13. Tian G., Fan Y., Wang H., Zheng H., Gao M., Liu J. et al. Studies on the thermal optical properties and solar heat gain of thin membrane structure industrial building. *Solar Energy*. 2021; 213:81-90. DOI: 10.1016/j.solener.2020.10.083

14. Pasyuta A.V. *Strength and rigidity of a rectangular hanging reinforced concrete shell with external*

sheet reinforcement : abstract of the dis. ... candidate of technical sciences. Moscow, 1989; 20. (rus.).

15. Haonan H., Yaozhi L. Experimental methods and performance of membrane structures : a systematic literature review. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2023; 11:1-11.

16. Pang Y., Qiu G., Gong J. A material model describing the nonlinear biaxial tensile behavior of fabric membrane in precise forming for inflated structures. *Structures*. 2024; 70:107884. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107884

17. Xu J., Zhang Y., Fang J., Wang X. Nonlinear mechanical behavior of architectural coated fabric and uncertainty analyses for FE model of tensioned membrane structure. *Structures*. 2024; 69:107505. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107505

18. Bedov A.I., Vagapov R.F., Gabitov A.I., Salov A.S. Calculations of 3D Anisotropic Membrane Structures

Under Various Conditions of Fixing. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):92-98. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-92-98. EDN OCHNLT.

19. Freiherrrova N., Krejsa M. Stress analysis of basic shapes of membrane structures. AIP Conference Proceedings. *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2019 (ICNAAM-2019)*. 2020; 130009. DOI: 10.1063/5.0026523. EDN VODLHI.

20. Marbaniang A.L., Kabasi S., Ghosh S. Interactive exploration of tensile membrane structures for conceptual and optimal design. *Structures*. 2024; 60:105983. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105983. EDN QAJPHA.

21. Tusnin A.R., Postarnak M.V. Testing of the membrane floor slab model of multi-storey buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:26-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI. (rus.).

Received January 23, 2025.

Adopted in revised form on January 27, 2025.

Approved for publication on February 21, 2025.

B I O N O T E S : **Aleksandr R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7034-0713, ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; tusninar@mgsu.ru;

Ekaterina K. Gracheva — postgraduate student of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5824-8160, ID RSCI: 1146313, ORCID: 0009-0003-0606-7986; ketrincat1@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.157:692.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717

Расчет вакуумного анкера на выдергивающее усилие в установках использования энергии морских волн

Виктор Владимирович Миронов¹, Евгений Александрович Ерофеев¹,
Юрий Андреевич Иванюшин¹, Анастасия Александровна Кадысева²

¹ Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании объектов преобразования волновой энергии с использованием плавучих буйев необходимо надежное закрепление их на донной поверхности. На сегодняшний день разработано множество технических решений по использованию энергии волны с различными видами фиксации плавучих буйев с донной поверхностью (грузы, анкеры, якоря).

Материалы и методы. Для решения задачи фиксации плавучих буйев, съемников энергии морских волн, с донным грунтом предлагается конструкция вакуумного анкера. Целью исследования является обоснование технического решения по применению вакуумных анкеров в установках использования энергии морских волн, предназначенных для жизнеобеспечения прибрежных объектов некапитального строительства. Для достижения поставленной цели применялись методы теоретических и экспериментальных исследований, поиск отечественных и зарубежных источников с анализом и сопоставлением данных.

Результаты. Представлены принципиальные схемы конструкции вакуумных анкеров, устраиваемых в слабых грунтах. Предлагается техническое решение и расчет удерживающей способности вакуумного анкера. По итогам экспериментальных исследований определен коэффициент трения покоя поверхности вакуумного анкера из полимерного материала в илистом обводненном грунте, позволяющий выполнять расчеты погружения и выдергивания вакуумных анкеров в слабых грунтах. Описана технология погружения вакуумных анкеров в слабый донный грунт, выполнен расчет условия погружения анкера в донный грунт и условия его выдергивания из донного грунта.

Выводы. Предлагаемые вакуумные анкеры для применения в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью при относительно небольших размерах и стоимости с учетом строительно-монтажных работ. Внедрение их в практику снизит затраты на сооружение оснований плавучих съемников энергии морских волн и трансформацию энергии в полезную мощность в различных технологических схемах жизнеобеспечения объектов прибрежных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вакуумный анкер, донный грунт, съемники энергии морских волн, тепло- и водоснабжение объектов прибрежных морских территорий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Миронов В.В., Ерофеев Е.А., Иванюшин Ю.А., Кадысева А.А. Расчет вакуумного анкера на выдергивающее усилие в установках использования энергии морских волн // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 709–717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717

Автор, ответственный за переписку: Юрий Андреевич Иванюшин, ivanjushinja@tyuiu.ru.

Analysis of a pullout force acting on vacuum anchors in sea wave energy converters

Viktor V. Mironov¹, Evgeniy A. Erofeev¹, Yuriy A. Ivanyushin¹, Anastasiya A. Kadyseva²

¹ Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation;

² Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When sea wave energy converters are designed, floating buoys, being part of their structure, must be reliably anchored to the bottom. To date, numerous engineering solutions are developed towards this end. They feature various methods of fixing floating buoys to the bottom (weights, anchors, and sinkers).

Materials and methods. The vacuum anchor is designed to fix floating buoys, or sea wave energy extractors, to the soil of the sea bottom. The goal of the study is to substantiate the engineering solution to use vacuum anchors for sea wave energy converters, designated for temporary coastal construction facilities. Methods of theoretical and experimental research, identification of domestic and foreign sources, analysis and comparison of data were employed to achieve this goal.

Results. The article presents conceptual schemes of vacuum anchors to be embedded in weak soils. The authors offer an engineering solution and analyze the holding capacity of a vacuum anchor. As a result of experimental studies, the value of the static friction coefficient is found on the surface of a polymer vacuum anchor in silty waterlogged soil. This coefficient allows analyzing the immersion of vacuum anchors in weak soils and the pullout of vacuum anchors from weak soils. The authors describe the technology of vacuum anchor immersion in weak bottom soil; analyze conditions for the anchor immersion in the weak soil of the bottom, and conditions for the anchor pullout.

Conclusions. Vacuum anchors, designed for weak bottom soils, have a great holding capacity, relatively small dimensions and cost, including the cost of construction and embedment. Their practical application will reduce the cost of (1) foundations made for floating sea wave energy extractors and (2) energy transformation into useful power in various process flows designed to generate energy for coastal construction facilities.

KEYWORDS: vacuum anchor, bottom soil, sea wave energy extractors, heat and water supply to coastal construction facilities

FOR CITATION: Mironov V.V., Erofeev E.A., Ivanyushin Yu.A., Kadyseva A.A. Analysis of a pullout force acting on vacuum anchors in sea wave energy converters. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):709-717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717 (rus.).

Corresponding author: Yuriy A. Ivanyushin, ivanjushinja@tyuiu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Будучи фактором существования жизни на Земле, в Мировом океане содержится огромное количество энергии, среди которой по видам можно выделить: энергию морских течений, осмотическую энергию, тепловую энергию океана, энергию приливов и отливов, а также энергию морских волн. Каждый вид энергии достаточно широко исследован. Среди преимуществ энергии волн следует выделить ее значительные запасы, высокую плотность и широту распространения [1, 2]. Тем не менее в каждом отдельном случае необходимо учитывать условия размещения объектов преобразования волновой энергии, в том числе с целью повышения эффективности ее преобразования.

Имеется множество технических решений по использованию возобновляемой энергии морских волн для выработки электроэнергии. Есть технические решения по преобразованию энергии морских волн в пневматическую мощность, применяемую для автономного теплоснабжения и кондиционирования воздуха зданий и сооружений. Энергия морских волн может быть также преобразована в гидравлическую мощность высокого давления для опреснения морской воды в обратноосмотических установках автономного водоснабжения населения прибрежных территорий [3, 4]. Как правило, большинство таких технических решений по съему энергии морских волн [4, 5] включают в себя плавучий буй, генератор полезной мощности и донный груз.

При этом для удержания различных морских платформ, в том числе шельфовых платформ добычи нефти и газа, различного назначения барж, широкое распространение получили и сегодня используются так называемые мертвые якоря¹. Если говорить о конструкциях креплений, обеспечивающих устойчивость за счет собственного веса, среди которых и мертвые якоря, то их применению на этапе закрепления основания сопутствуют значительные транс-

портные, погрузочно-разгрузочные, земляные, трудовые и, как следствие, финансовые затраты [6].

В связи с этим интересно применение вакуумных технологий при организации свайных фундаментов и оснований, как источника повышения технико-экономической эффективности, производительности труда и надежности работы используемых устройств. Так, сваевдавливающие устройства могут оборудовать вакуумными камерами, предназначенными для восприятия реактивных усилий грунта при погружении свай [7–9].

Как альтернатива применению донных грузов в строительстве, разработаны конструкции вакуумных анкеров [10–13]. Вакуумный анкер, как и донный груз, фиксирует корпус генератора энергии в неподвижном состоянии, а подвижный рабочий орган генератора полезной мощности связан с плавучим бумом, совершающим колебательные движения, вызванные волновым воздействием. Использование вакуумных анкеров предпочтительнее по сравнению с тяжелыми донными грузами. Вакуумные анкера легко устанавливаются без применения тяжелой техники и также легко демонтируются в случае необходимости. Вакуумные донные анкера, помимо фиксации поплавковых устройств, снимающих энергию морских волн, нашли применение в гидротехническом и трубопроводном строительстве, судостроительстве в качестве удерживающих устройств и в нефтегазовой промышленности для фиксации плавучих буровых платформ. Также вакуумные насосы, как основное оборудование для создания отрицательного давления, используются при ликвидации разливов нефти в составе конструкции вакуумных скиммеров [14] как на стационарных платформах, так и в составе подвижных плавучих средств.

Также стоит отметить, что вакуумные технологии могут использоваться и в классических технологических строительных процессах, например, для консолидации грунтов оснований технологических сооружений [15, 16] в качестве методов водопонижения при защите зданий и сооружений от грунтовых и подземных вод [17, 18].

¹ Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения : учеб. для вузов. Ч. 1. Конструирование. М. : Недра, 2006. 555 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — обоснование применимости вакуумных анкеров совместно с плавучими буйами в установках использования энергии морских волн высокой повторяемости и обеспеченности для жизнеобеспечения различных объектов прибрежных морских территорий. Для вдавливания вакуумных анкеров в донный грунт используется минимум оборудования и техники. Основное оборудование — это насос, откачивающий воду из тела полого вакуумного анкера, создавая в нем разрежение. За счет атмосферного давления и гидростатического давления столба жидкости вакуумный анкер погружается в донный грунт. Для демонтажа вакуумного анкера достаточно создать избыточное давление внутри него, которое поднимет анкер из донного грунта [13]. Вакуумные анкеры предназначены для работы на выдергивающее усилие.

Технические решения по преобразованию энергии морских волн (объекты волновой энергетики) круглогодично работоспособны и экономически эффективны только в незамерзающих морских акваториях [3]. В связи с этим вопросы работоспособности вакуумных анкеров в замерзающих в период действия отрицательных температур морских акваториях не рассматривались, хотя и являются направлением дальнейших исследований.

На рис. 1, 2 представлены схемы предлагаемых вакуумных анкеров, устанавливаемых в слабых осадочных донных грунтах, и их фотографии.

Расчетные зависимости. В статье предлагается расчет вдавливания и удерживающей способности вакуумного анкера с учетом сил трения анкера об осадочный донный грунт. При откачке воды из тела анкера в процессе его установки в полости анкера будет образовываться вакуум и анкер будет погружаться в грунт до тех пор, пока силы трения грунта о поверхность анкера не превысят силу вдавливания, которая зависит от гидростатического давления, степени разрежения и диаметра цилиндрического полого анкера. Если толщина осадочного донного грунта незначительна и анкер при погружении достигает водоупорного слоя, то процесс вдавливания прекращают. Анкер можно эксплуатировать при одном условии: выдергивающее усилие, вызванное колебаниями плавучего буя, не должно приводить к образованию абсолютного давления внутри анкера, меньшему, чем давление насыщенных паров воды при заданной температуре. Это условие необходимо для предотвращения срыва анкера в результате парообразования внутри анкера с последующим схлопыванием пузырьков пара и кавитацией. Если толщина слоя слабого грунта достаточно большая или силы трения грунта о тело анкера при его вдавливании в грунт не позволяют достичь при погружении анкера водоупорного слоя, то при прикладывании выдергивающего усилия с образованием разрежения внутри тела анкера будет происходить фильтрация воды в полость анкера, что снижает его удерживающую способность. В этом случае профильтровав-

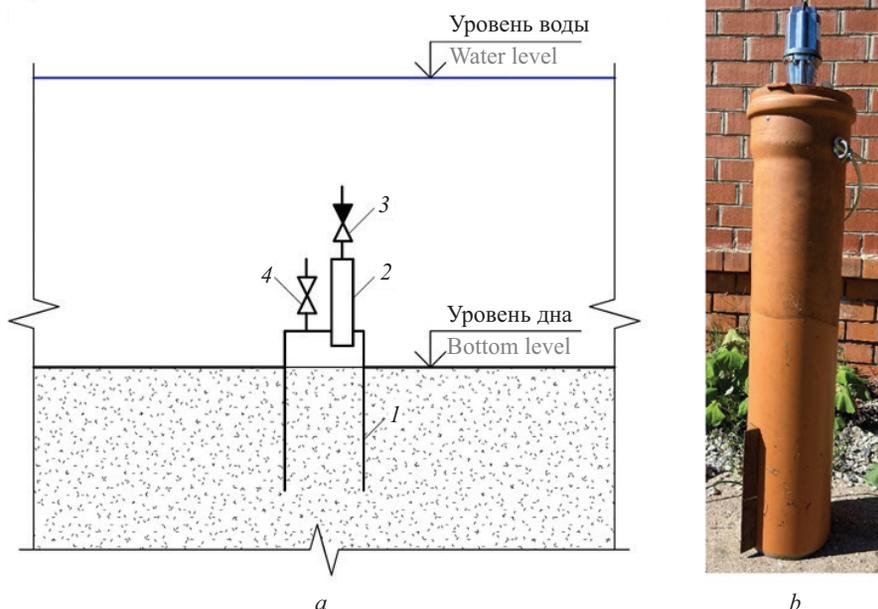


Рис. 1. Вакуумный анкер, устанавливаемый в слабый донный грунт: *a* — схема вакуумного анкера; *b* — внешний вид прототипа вакуумного анкера (фотография); *1* — тело вакуумного анкера; *2* — насос для откачки воды при его установке; *3* — обратный клапан; *4* — запорная арматура, используемая для создания избыточного давления в теле анкера при его демонтаже

Fig. 1. Vacuum anchor embedded in weak sea bottom soil: *a* is the vacuum anchor schematic; *b* is the external view of the vacuum anchor prototype (the photo); *1* is the vacuum anchor body; *2* is the pump to remove water during anchor embedment; *3* is the back valve; *4* is the shut-off valve to create excess pressure in the anchor body during dismantling

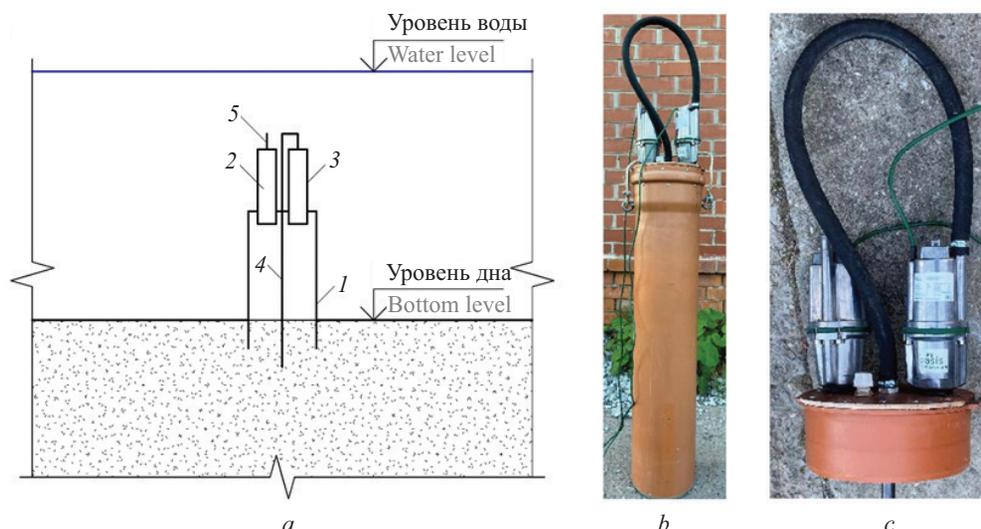


Рис. 2. Вакуумный анкер, устанавливаемый в плотном песчаном грунте с предварительным размывом: *a* — схема вакуумного анкера; *b* — внешний вид конструкции (фотография); *c* — внешний вид верхней части анкера (фотография); *1* — тело вакуумного анкера; *2* — насос для откачки воды из полости вакуумного анкера; *3* — насос для размыва плотного донного грунта; *4* — трубопровод для размыва плотного донного грунта; *5* — патрубок для откачки воды и пульпы из полости вакуумного анкера

Fig. 2. Vacuum anchor embedded in dense sandy soil subjected to erosion: *a* is the schematic of a vacuum anchor; *b* is the external view of the structure (the photo); *c* is the external view of the anchor head (the photo); *1* is the body of the vacuum anchor; *2* is the pump to remove water from the vacuum anchor cavity; *3* is the pump to erode dense bottom soil; *4* is the pipeline to erode dense bottom soil; *5* is the nozzle to pump water and pulp from a cavity in the vacuum anchor

шуюся воду требуется удалять из полости анкера. Для этого можно использовать циклически работающий насос с приводом от энергии морских волн, установленный на плавучем бье. В пределе силы трения грунта о поверхность вакуумного анкера при его погружении не должны превышать силу вдавливания вакуумного анкера в донный грунт F , которую можно установить следующим образом:

$$F = \frac{1}{4} \cdot (\rho \cdot g \cdot H + p_a - p_{\text{абс}}) \cdot \pi \cdot D^2, \quad (1)$$

где F — сила вдавливания вакуумного анкера в донный грунт, Н; ρ — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H — глубина акватории в месте размещения, м; p_a — атмосферное давление, Па; $p_{\text{абс}}$ — абсолютное давление в теле вакуумного анкера при откачке из него воды, Па; D — диаметр поперечного сечения круглого вакуумного анкера, м.

Расчетная схема для определения силы трения анкера о донный грунт приведена на рис. 3.

Силы трения донного грунта о тело вакуумного анкера можно определить по формуле:

$$T = \int_0^L 2 \cdot k \cdot (\rho \cdot g \cdot H + p_a + \rho_0 \cdot g \cdot h) \cdot \pi \cdot D \cdot dh, \quad (2)$$

где T — сила трения обводненного грунта о тело вакуумного анкера, Н; L — длина вакуумного анкера, м; k — коэффициент трения покоя поверхности анкера о донный грунт, представляющий собой отношение

силы трения к силе давления обводненного грунта на поверхность вакуумного анкера; ρ_0 — плотность обводненного грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$; h — текущая глубина погружения анкера в донный грунт, не превышающая длины анкера, м; dh — вертикальный размер элементарной площадки тела анкера.

Чем больше диаметр поперечного сечения круглого вакуумного анкера, тем больше его удерживающая способность. Как верно отмечено в работе [10], при увеличении диаметра в 10 раз (например, от 100 до 1000 мм) удерживающая способность увеличивается в 15,6 раза. Зависимость удерживающей способности от давления $p_{\text{абс}}$ в теле вакуумного анкера обратно пропорциональная: при создании абсолютного вакуума (идеальные условия) в теле анкера (вакуумной камере) его удерживающая способность будет на 25 % выше в сравнении с анкером аналогичной конструкции, во внутреннем объеме которого будет существовать атмосферное давление. При этом зависимость удерживающей способности анкера в зависимости от его длины L носит прямой параболический характер².

Таким образом, в случае негативного изменения характеристик морской акватории (избыточное волнение морской поверхности), с точки зрения практики проектирования аналогично свайным и ан-

² Гулин Д.А. Обеспечение устойчивости трубопроводов в слабонесущих грунтах с использованием вакуумных анкерных устройств : автореф. дис. канд. техн. наук. Уфа : УГНТУ, 2019. 24 с.

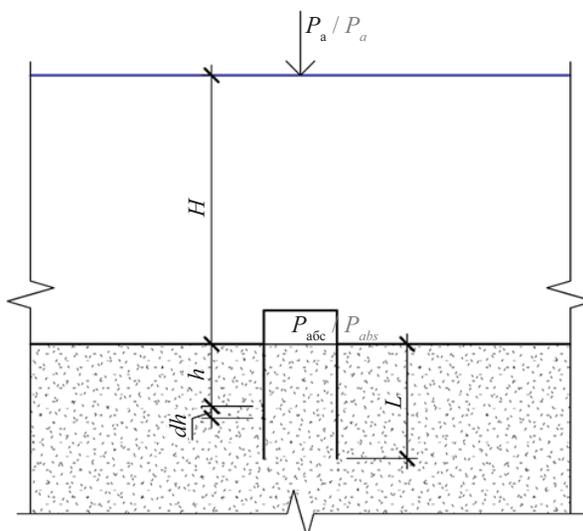


Рис. 3. Схема для расчета силы трения поверхности вакуумного анкера о донный грунт

Fig. 3. Schematic for analyzing the force of the vacuum anchor surface friction on the bottom soil

керным фундаментам морских сооружений при подборе геометрических параметров вакуумного анкера его удерживающую способность можно повысить за счет увеличения вышеобозначенных характеристик и, как следствие, возникающих сил трения. Также при обосновании, с целью повышения надежности и безопасности, размещенные вакуумные анкеры могут дублироваться (с целью распределения расчетной нагрузки).

Формула (2) получена из предположения, что на некоторой элементарной площадке с вертикальным размером dh , расположенной на глубине h , давление во всех точках этой площадки одинаково. Донный грунт соприкасается с телом вакуумного анкера с внешней и внутренней его поверхности, поэтому сила трения удваивается.

При погружении вакуумного анкера в донный обводненный грунт должно соблюдаться условие неравенства:

$$F > T. \quad (3)$$

При несоблюдении условия неравенства (3) погружение вакуумного анкера в донный грунт прекратится.

Сложность использования формулы (2) в расчетах удерживающей силы вакуумного анкера заключается в неопределенности коэффициента трения покоя анкера о донный грунт [19, 20]. Он зависит от материала, из которого изготовлен вакуумный анкер и свойств обводненного донного грунта. Коэффициент трения каждый раз должен определяться опытным путем в месте установки вакуумного анкера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Тюменском индустриальном университете были проведены эксперименты по определению

коэффициента трения покоя вакуумного анкера со стенкой из полиэтиленового материала в илистом обводненном грунте. Общий вид установки по установлению коэффициента трения вакуумного анкера о донный грунт показан на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид установки по определению коэффициента трения вакуумного анкера о донный грунт: 1 — пластиковый трубный вакуумный анкер с погружным электронасосом внутри; 2 — талреп; 3 — крановые весы
Fig. 4. General view of a unit used to find the coefficient of the vacuum anchor friction on the bottom soil: 1 — plastic pipe-shaped vacuum anchor with a submersible electric pump inside; 2 is a stretching screw; 3 is a crane scale

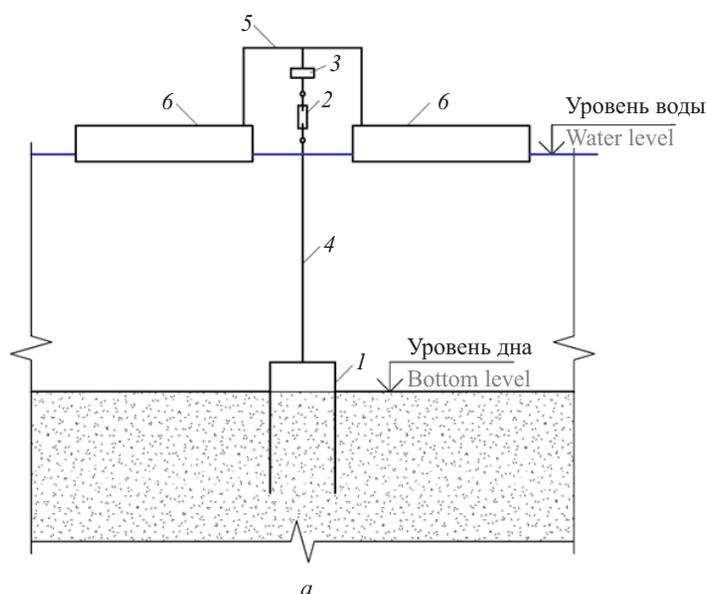


Рис. 5. Схема установки по определению коэффициента трения в акватории: 1 — вакуумная свая в донном грунте; 2 — талреп (винтовая стяжка); 3 — крановые весы; 4 — трос; 5 — жесткая рама; 6 — понтоны

Fig. 5. Schematic of a unit used to find the value of the friction coefficient in the water area: 1 is a vacuum pile in the bottom soil; 2 is a stretching screw; 3 is a crane scale; 4 is a cable; 5 is a rigid frame; 6 are pontoons

Коэффициент трения покоя определялся с использованием крановых весов, измеряющих выдерживающее усилие на установленный вакуумный анкер с известными размерами и глубиной погружения в донный грунт. Крановые весы закреплялись на жесткой неподвижной раме, размещенной на понтонах. Схема установки по определению коэффициента трения, расположенной в акватории, представлена на рис. 5.

Выдерживающее усилие имитировалось талрепом. Фиксировалось усилие на крановых весах, при котором начинались подвижки вакуумного анкера. Выдерживающее усилие можно смоделировать также закачкой через запорную арматуру 4 (рис. 1) воды, измеряя при этом давление и вычисляя силу, выталкивающую вакуумный анкер из донного грунта, зная площадь поперечного сечения анкера. Коэффициент трения определялся расчетным путем из формулы (2), приравнивая показания крановых весов к силе трения анкера о донный илистый грунт. Экспериментальные результаты показали, что для пластиковых трубных вакуумных анкеров различных диаметров: 0,11; 0,16; 0,25 м коэффициент трения покоя в среднем составляет $k = 0,01$. Данная методика установления коэффициента трения может быть применима для любых слабых осадочных грунтов при определении предельной глубины погружения цилиндрического вакуумного анкера с заданными размерами и свойствами материала, из которого он изготовлен, а также гидростатического давления воды в месте установки.

В качестве гипотетического примера рассмотрим погружение вакуумного анкера с диаметром поперечного сечения $D = 0,5$ м и длиной

$L = 3$ м в обводненный илистый грунт на глубину $H = 5$ м в морской акватории с плотностью воды $\rho = 1020$ кг/м³. Плотность обводненного илистого грунта $\rho_0 = 1040$ кг/м³. Коэффициент трения тела анкера об илистый грунт $k = 0,01$. Атмосферное давление составляет $p_a = 105$ Па, абсолютное давление внутри вакуумного анкера при работе насоса, откачивающего воду из полости анкера, $p_{\text{абс}} = 0,2 \cdot 10^5$ Па. Расчет по формулам (1) и (2) показал, что сила вдавливания вакуумного анкера в обводненный илистый грунт составляет $F = 2,55 \cdot 10^4$ Н. Сила трения анкера об обводненный донный илистый грунт равна $T = 1,56 \cdot 10^4$ Н. Условие неравенства (3) соблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из вышеизложенного в статье материала можно сделать вывод, что относительно недорогие вакуумные анкеры при установке их в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью. Такие анкеры могут применяться для фиксации различных плавающих средств в акваториях с осадочными донными грунтами. Если вакуумный анкер при погружении полностью проходит слабый осадочный грунт и достигает водоупорного слоя, то его можно эксплуатировать без откачки воды из тела анкера. Единственное условие при прикладывании к анкеру выдерживающего усилия — абсолютное давление внутри тела анкера не должно быть меньше давления насыщенных паров воды при заданной температуре для предотвращения срыва анкера (парообразование внутри тела анкера с последующей кавитацией). Если вакуумный анкер при вдавливании в грунт не доходит до водоупорно-

го слоя по причине высокого коэффициента трения грунта о тело анкера или большой толщи слабого осадочного донного грунта, то при прикладывании к нему выдергивающей нагрузки возможна фильтрация воды в тело анкера с вакуумом внутри него. В этом случае эксплуатация вакуумного анкера невозможна без откачки воды, профильтрованной в тело анкера. Откачка воды необходима для предотвращения выхода вакуумного анкера из слабого донного грунта. Для этого можно использовать один из насосов с приводом от энергии морских волн, установленных на плавучем бье. Этот насос должен

выполнять работу по циклической откачке профильтрованной воды из тела анкера.

Вакуумные анкеры являются отличным решением для фиксации плавучих съемников энергии морских волн высокой повторяемости и обеспеченности в незамерзающих морях. Полученная энергия используется для жизнеобеспечения (тепло- и водоснабжения) объектов, как правило, некапитального прибрежного строительства, в том числе строящихся и активно развивающихся пляжных морских глэмпингов в рамках реализации национального проекта «Туризм и индустрия гостеприимства».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qiu S., Liu K., Wang D., Ye J., Liang F. A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 113. P. 109271. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109271
2. Lehmann M., Karimpour F., Goudey C.A., Jacobson P.T., Alam M-R. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. Pp. 300–1313. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.101
3. Миронов В.В., Ивановишин Ю.А., Суглобов Д.А., Миронов Д.В., Максимов Л.И. Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 4. С. 618–630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630
4. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves : a review // *Desalination*. 2018. Vol. 435. Pp. 161–171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.049
5. Ahamed R., McKee K., Howard I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems : a review // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 204. P. 107248. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107248
6. Некучаев В.О., Семиткина Е.В., Терентьева М.В., Кривов В.Е. Совершенствование конструктивных решений по закреплению магистрального газопровода в условиях слабонесущих грунтов // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2023. № 5–6. С. 5–12. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12. EDN BILHWZ.
7. Судницына Е.С., Вахрушев С.И. Исследования способов повышения эффективности погружения свай методом вдавливания // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2017. Т. 1. С. 365–380. EDN XNYGDR.
8. Авторское свидетельство № 1409728 А1 СССР, МПК E02D 7/20. Устройство для погружения анкеров вдавливанием / Циферов В.М., Толстов А.В., Павлов А.Б., Никитин В.И., Харько А.М.; заявитель Московский геологоразведочный институт им. Сер-
- го Орджоникидзе; заявл. № 3948224 от 02.09.1985; опубл. 15.07.1988. EDN ZFJKJ.
9. Патент RU № 23629 U1, МПК E02D 7/20. Устройство для погружения свай вдавливанием / Ганеев Н.В., Нестеров А.С.; заявитель Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия; заявл. № 2001132-378/20 от 28.11.2001; опубл. 27.06.2002. EDN QCONIG.
10. Гулин Д.А., Салихов Б.И., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М. Расчет удерживающей способности вакуумного анкерного устройства // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017. № 3. С. 33–37. EDN YWJKJS.
11. Миронов В.В., Ивановишин Ю.А., Суглобов Д.А. Вакуумный анкер для съемников энергии морских волн // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023* : сб. докл. IV Нац. науч. конф. 2024. С. 43–46. EDN DQZHXE.
12. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors : a review // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. P. 113607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113607
13. Zawawi N.A.W.A., Danyaro K.U., Liew M.S., Shawn L.E. Environmental Sustainability and Efficiency of Offshore Platform Decommissioning : a Review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 17. P. 12757. DOI: 10.3390/su151712757
14. Кайаду У.Де.С. Экологические риски при бурении скважин // *Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире* : сб. науч. ст. по мат. I Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 186–193. EDN NXJPLG.
15. Yang S., Jianting F., Chenchen Q., Jiawei W. Two-dimensional consolidation theory of vacuum preloading combined with electroosmosis considering the distribution of soil voltage // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020. Vol. 57. Issue 1. Pp. 25–34. DOI: 10.1007/s11204-020-09633-8
16. Патент RU № 2714406 C1 РФ, МПК E02D 3/11. Способ вакуумного уплотнения основания строительной конструкции / Гарбузов В.В., Харьков Н.С., Пащенко Ф.А.; заявитель АО «ПИИНИИ ВТ «Лен-

аэропроект»; заявл. № 2019131739 от 08.10.2019; опубл. 14.02.2020. EDN RXAQJX.

17. Забелина О.Б., Энгин Д. Исследование методов водопонижения при строительстве высотных зданий в условиях прибрежных районов Санкт-Петербурга // *Перспективы науки*. 2021. № 3 (138). С. 199–202. EDN JDAAYP.

18. Игидов Т.Ш. Водопонижение грунтовых вод как необходимая задача начального этапа строительства // *Евразийский научный журнал*. 2016. № 11. С. 292–295. EDN XDSQSV.

19. Коронатов В.А., Герасимов С.Н., Дудина И.В. Теория погружения сваи в грунт при продольно-вибрационном воздействии // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 4 (48). С. 26–31. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-26-31. EDN VTEPYH.

20. Бояринцев А.В., Самохина А.Д. Экспериментальное изучение изменения шероховатости поверхности материала подземной конструкции при ее погружении в грунт // *Construction and Geotechnics*. 2023. Т. 14. № 2. С. 75–91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06. EDN KHWFIS.

Поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 15 января 2025 г.

Одобрена для публикации 5 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Владимирович Миронов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AАН-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Евгений Александрович Ерофеев — старший преподаватель кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 815321, Scopus: 6508213719, ORCID: 0000-0002-8273-6956; erofeevea@tyuiu.ru;

Юрий Андреевич Иванюшин — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushinja@tyuiu.ru;

Анастасия Александровна Кадысева — доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций; **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; РИНЦ ID: 698088, Scopus: 57214243999, ResearcherID: M-6451-2016, ORCID: 0000-0001-8703-5684; kadyseva@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Qiu S., Liu K., Wang D., Ye J., Liang F. A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 113:109271. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109271
2. Lehmann M., Karimpour F., Goudey C.A., Jacobson P.T., Alam M-R. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 74:1300-1313. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.101
3. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglov D.A., Mironov D.V., Maksimov L.I. Life support technology of beach glamping using renewable energy of sea waves. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(4):618-630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630 (rus.).
4. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves : a review. *Desalination*. 2018; 435:161-171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.049
5. Ahamed R., McKee K., Howard I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems : a review. *Ocean Engineering*. 2020; 204:107248. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107248
6. Nekuchaev V.O., Semitkina E.V., Terent'yeva M.V., Krivov V.E. Improving design solutions for fixing the main gas pipeline in conditions of weakly bearing soils. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2023; 5-6:5-12. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12. EDN BILHWZ. (rus.).
7. Sudnitsyna E.S., Vakhrushev S.I. Investigating ways to improve pile pressing efficiency. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2017; 1:365-380. EDN XNYGDR. (rus.).
8. Certificate of authorship No. 1409728 A1 USSR, IPC E02D 7/20. *Anchor driving device by pressing / Ciferov V.M., Tolstov A.V., Pavlov A.B., Nikitin V.I., Har'ko A.M.; applicant Moscow Geological Prospecting Institute named after Sergo Ordzhonikidze; No. 3948224 filing 02.09.1985; publ. 15.07.1988. EDN ZFJKJ. (rus.).*

9. Patent RU No. 23629 U1, IPC E02D 7/20. *Device for driving piles by pressing* / Gapeev N.V., Nestorov A.S.; Siberian State Automobile and Highway Academy. No. 2001132378/20 filing 28.11.2001; publ. 27.06.2002. EDN QCONIG. (rus.).
10. Gulin D.A., Salikhov B.I., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M. Calculation of the carrying capacity of the vacuum anchor device. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2017; 3:33-37. EDN YWJKJS. (rus.).
11. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglobov D.A. Vacuum Anchor for Seawater Energy Extractors. *Current issues in the construction industry and education – 2023 : digest of reports IV National scientific conference*. 2024; 43-46. EDN DQZHXE. (rus.).
12. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors : a review. *Ocean Engineering*. 2023; 270:113607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113607
13. Zawawi N.A.W.A., Danyaro K.U., Liew M.S., Shawn L.E. Environmental Sustainability and Efficiency of Offshore Platform Decommissioning : a Review. *Sustainability*. 2023; 15(17):12757. DOI: 10.3390/su1517-12757
14. Kaiadu U.De.S. Environmental risks during well drilling. *Fundamental and applied scientific research in the modern world : Collection of scientific articles based on the materials of the I International scientific and practical conference*. 2023; 186-193. EDN NXJPLG. (rus.).
15. Yang S., Jianting F., Chenchen Q., Jiawei W. Two-dimensional consolidation theory of vacuum preloading combined with electroosmosis considering the distribution of soil voltage. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020; 57(1):25-34. DOI: 10.1007/s11204-020-09633-8
16. Patent RU No. 2714406 C1, IPC E02D 3/11. *Method of vacuum sealing of base of building structure* / Garbuzov V.V., Kharkov N.S., Pashchenko F.A.; proprietor Design, Survey and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproekt”; No. 2019131739 filing 08.10.2019; publ. 14.02.2020. EDN RXAQJX. (rus.).
17. Zabelina O.B., Engin D. Research into methods of dewatering during the construction of high-rise buildings in the coastal areas of St. Petersburg. *Science Prospects*. 2021; 3(138):199-202. EDN JDAAYP. (rus.).
18. Igidov T.Sh. Groundwater lowering as a necessary task of the initial stage of construction. *Eurasian Science Journal*. 2016; 11:292-295. EDN XDSQSV. (rus.).
19. Koronotov V.A., Gerasimov S.N., Dudina I.V. Theory of pile immersion in the ground under longitudinal vibration action. *Systems. Methods. Technologies*. 2020; 4(48):26-31. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-26-31. EDN VTEPYH. (rus.).
20. Boyarintsev A.V., Samohina A.D. Experimental investigation of surface roughness changes of an underground structure’s material during its driving into the ground. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(2):75-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06. EDN KHWFIS. (rus.)

Received November 5, 2024.

Adopted in revised form on January 15, 2025.

Approved for publication on March 5, 2025.

B I O N O T E S : **Viktor V. Mironov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AAH-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Evgeniy A. Erofeev — senior lecturer of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 815321, Scopus: 6508213719, ORCID: 0000-0002-8273-6956; erofeeva@tyuiu.ru;

Yuriy A. Ivanyushin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushinja@tyuiu.ru;

Anastasiya A. Kadyseva — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department Agricultural Water Supply, Water Disposal, Pumps and Pumping Stations; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy**; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russian Federation; ID RSCI: 698088, Scopus: 57214243999, ResearcherID: M-6451-2016, ORCID: 0000-0001-8703-5684; kadyseva@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.

Актуализация линейной телескопической модели осадки сваи

Андрей Григорьевич Алексеев^{1,2}, Степан Георгиевич Безволев²

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

² *Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Научно-исследовательского центра «Строительство» (НИИОСП НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Показана целесообразность повышения точности и общности упрощенных решений для расчета осадки одиночных свай. Такие решения рекомендованы строительными нормами РФ для оценки величины проектной осадки свай, а также применяются для определения параметров контактных моделей при разработке конструкций свайных фундаментов.

Материалы и методы. Выполнены теоретический анализ и сопоставление методов расчета, основанных на аппроксимации работы сваи в упругом полупространстве. Осуществлена проверка и разработана актуализация зависимостей основного аналитического решения, исходящего из телескопической схемы работы вмещающего сваю упругого массива.

Результаты. Представлены результаты сопоставления расчетов различными методами. Анализ выявил ряд расхождений в зависимости от параметров свай и грунтового основания. Разработаны рекомендации по применению рассмотренных решений и установлена область их использования — оценка начального линейного сопротивления сваи и соответствующих параметров контактной модели, применяемой для конструирования свайного фундамента.

Выводы. Упрощенные решения для расчета осадки одиночных свай востребованы строительной практикой, повышение точности и общности таких решений обеспечивает определение адекватных параметров контактных моделей для разработки надежных и рациональных конструкций свайных фундаментов. Область использования актуализированного решения — оценка начального линейного сопротивления сваи. Достоинством актуализированного решения является четко выделенная доля пяты сваи, что позволяет отдельно оценить работу ее боковой поверхности, в частности, в актуальных задачах с выдерживающей нагрузкой на сваю или по учету «выключения» пяты сваи из-за рыхлого шлама под пятой буронабивной сваи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свая, осадка сваи, допустимая нагрузка на сваю, аналитическое решение, контактная модель, строительные нормы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алексеев А.Г., Безволев С.Г. Актуализация линейной телескопической модели осадки сваи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 718–733. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.718-733

Автор, ответственный за переписку: Степан Георгиевич Безволев, compgeo@ya.ru.

Updating the linear telescopic pile settlement model

Andrej G. Alekseev^{1,2}, Stepan G. Bezvolev²

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

² *Research, Design and Survey and Design and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov of the Research Centre “Construction”; Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The expediency of increasing the accuracy and generality of simplified solutions for calculating the settlement of single piles is shown. Such solutions are recommended by the building codes of the Russian Federation for assessing the value of the design settlement of piles, and are also used to determine the parameters of contact models in the development of pile foundation structures.

Materials and methods. The theoretical analysis and comparison of calculation methods based on the approximation of pile work in an elastic half-space are performed. A verification and update of the dependencies of the main analytical solution based on the telescopic scheme of the elastic massif containing the pile is developed. Comparisons of the calculation results by various methods are presented.

Results. The analysis revealed a number of discrepancies depending on the parameters of the piles and the soil base. Recommendations for the application of the considered solutions are developed and the area of their application is established — assessment of the initial linear resistance of the pile and the corresponding parameters of the contact model used to design the pile foundation.

Conclusions. Simplified solutions for calculating the settlement of single piles are in demand in construction practice; increasing the accuracy and generality of such solutions ensures the definition of adequate parameters of contact mod-

els for developing reliable and rational designs of pile foundations. The scope of the updated solution is the assessment of the initial linear resistance of the pile. The advantage of the updated solution is the clearly identified share of the pile heel, which allows for a separate assessment of the work of its lateral surface, in particular in current problems with a pull-out load on the pile or by taking into account the “switching off” of the pile heel due to loose slurry under the heel of a bored pile.

KEYWORDS: pile, pile settlement, permissible load on a pile, analytical solution, contact model, building codes

FOR CITATION: Alekseev A.G., Bezvolev S.G. Updating the linear telescopic pile settlement model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):718-733. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.718-733 (rus.).

Corresponding author: Stepan G. Bezvolev, compgeo@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению взаимодействия свайного фундамента с грунтовым массивом посвящено огромное количество научных работ. Разработаны различные аналитические и численные решения для прогноза несущей способности и осадки свай. Строгий учет совместной работы свай и нелинейной работы грунта возможен лишь численным методом в пространственной постановке. Для этого численная модель должна обладать надлежащими конфигурацией разбивки и габаритами расчетной области, обеспечивающими приемлемость приближенности условий на ее внешних границах. В результате пространственный расчет, особенно при неоднородном грунтовом основании и учете нелинейности, требует использования высокопроизводительных ЭВМ и характеризуется большой трудоемкостью и слабо контролируемой погрешностью в зависимости от количества и качества исходных данных. При этом даже современные модели нелинейного деформирования грунтов под нагрузкой не позволяют учесть все аспекты их работы, в частности, в составе свайного основания. Например, отсутствуют практичные численные методы для моделей, допускающих, наряду с упругим и упрочняющимся деформированием грунтов, идеальную пластичность и/или разупрочнение.

В этой ситуации востребовано применение методов, сочетающих достаточно простые и общие расчетные формулы с эмпирическими правилами, обеспечивающими адекватность проектным задачам этих формул и методик определения величин, входящих в них параметров. Так, действующие нормы РФ по проектированию свайных фундаментов СП 24¹ для контроля результатов, получаемых численными методами, предписывают применение упрощенных методик оценки таких основных показателей, как допускаемая нагрузка на сваю и ее осадка. Хорошо отработанными являются нормативные методы оценки несущей способности одиночных свай по грунту. Установившейся практикой стало обязательное применение данных стандартных полевых испытаний грунтов зондированием и нагружением свай, а также их контрольных статических испытаний. Эти методы позволяют надежно

установить допускаемую (расчетную, рабочую) нагрузку на одиночную сваю P .

По опыту авторов менее разработаны и неадекватны нормативной допускаемой нагрузке на сваю существующие методы расчета осадки одиночной сваи. Они, как правило, основываются на частных табличных, графических или аналитических решениях, которые требуют усовершенствования из-за узкой области применимости и несоответствия процессу работы сваи во всем диапазоне допускаемой на нее нагрузки.

Между тем простая расчетная зависимость для осадки одиночной сваи весьма востребована, так как на ее основе строятся практические решения по расчету осадок групп свай и контактные модели для разработки конструкций свайных фундаментов [1]. Основанные на упругой основе простые зависимости дают возможность решать сложные динамические и реологические задачи. Поэтому повышение точности и общности упрощенной методики расчета осадки одиночной сваи имеет большое практическое значение.

Упрощенные методы расчета осадки одиночной и групповых свай, используемые в нормах СП 24 и справочных пособиях по проектированию свайных фундаментов [1–5], основаны на решениях теории упругости. Наибольшее развитие задача об осадке одиночной сваи получила в разработках 1960–1970-х гг. (Н.Г. Poulos, Е.Н. Davis [6, 7], В.Г. Федоровский [8], М.Ф. Randolph, С.Р. Wroth [9, 10]). Методика [9] стала прорывной и развивалась авторами и их учениками в [2, 11, 12]. Формулы, приводимые в СП 24 и публикации [1], были разработаны в работе [8] и уточнены в исследовании [13] по результатам численного моделирования с использованием моделей однородного и двухслойного упругого полупространства. Эти же модели применены в решениях [6, 7], а в трудах [9–12] также использовалось упругое основание Гибсона (с линейно возрастающим с глубиной модулем сдвига). С учетом упругой основы для применения этих решений необходимо ограничивать расчетную нагрузку на сваю величиной, в диапазоне которой деформации грунта в основном линейны.

Привлекательный подобную [9] упрощенную схему работы вмещающего сваю упругого массива, вывод частного аналитического решения представлен в работе [14], приближенно рассмотревшей краевую задачу о взаимодействии «длинной, но несжимаемой» сваи с окружающим и жестким подстилаю-

¹ СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. СНИП 2.02.03-85/ОА «НИЦ “Строительство”» — НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. М., 2022. 85 с.

щим грунтами ограниченного простираения. В частности, использована цилиндрическая двухслойная упругая ячейка конечных размеров — радиусом r_x и высотой $H = L + H_c$ (рис. 1, а).

В пределах глубины заглупления (рабочей длины) L сваи грунт с модулем деформации E_1 испытывает лишь деформации телескопического сдвига, подстилающий жесткий ($E_2 > 40$ МПа) слой толщиной H_c испытывает сжатие со сдвигом. Для ячейки ограниченных размеров существуют и более общие (без ограничения параметров сжимаемости сваи и грунтов) аналитические решения [15], разработанные для расчетов групповой сваи свайного фундамента при высоком и низком ростверке. В этом случае конкретный диаметр расчетной ячейки обусловлен симметрией и геометрическими параметрами (средним расстоянием между сваями) [16]. Общая проблема и погрешность использования аналитических [14], а также основной массы численных (МКЭ и др.) решений [3, 6, 7, 13, 17–22], для расчета осадки одиночной сваи обусловлены произволом в выборе размеров и параметров расчетной области, в частности r_x и H_c . Подобные величины указаны в рекомендациях СП 24 для численного моделирования графика нагрузка – осадка одиночной сваи (п. 7.7.13: $r_x \geq 5d$, $H_c \geq 3d$, где d — диаметр поперечного сечения сваи). Согласно СНиП II-Б.2² свая считалась одиночной при расстоянии до ближайшей сваи $r_x \geq 3d$. Другой вариант — r_x по применявшейся СНиП II-Б.5³ схеме условного фундамента ($r_x = d/2 + L \tan(\varphi/4)$, φ — осредненный в пределах L угол внутреннего трения грунтов); H_c — нормативная глубина сжимаемой толщи под условным фундаментом (СП 22⁴ и СП 24). Рекомендации СП 22 и СП 24 явно не отвечают отмеченным выше требованиям к граничным условиям

пространственной численной модели. Таким образом, моделирование по п. 7.7.13 СП 24 является приближенным инженерным методом, в рамках которого необходима полная регламентация выбора r_x и H_c , а также модели грунта и ее параметров.

В качестве еще одного альтернативного актуализируемого в статье метода отметим подход [4] к определению осадки одиночной сваи как суммы укорочения ствола s_c и сжатия грунта s_b от передаваемой на него пятой сваи нагрузки P_b . В работе [23] введенные в исследовании [4] составляющие осадки s_c и s_b предлагается суммировать с дополнительной составляющей осадки пяты сваи s_1 от нагрузки P_1 , передаваемой на грунт боковой поверхностью сваи. При этом в публикациях [4, 23] величины P_b и P_1 предполагаются заданными и легко определяемыми из расчетов по предельной несущей способности сваи. Однако во многих случаях это не так просто и в принципе не соответствует упругому подходу для определения осадки сваи. По этой причине в СНиП II-Б.5, пренебрегая составляющей s_c , суммарная осадка $s = s_b + s_1$ приближенно определялась по упомянутой выше схеме условного фундамента, равномерно распределяющего через подошву на грунт суммарную нагрузку $P = P_b + P_1$. Непосредственное рассмотрение условного действия на грунт нагрузки P (или P_b и P_1) упрощает расчеты деформаций грунта с учетом элементов его упруго-пластической работы в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки. Такое уточнение отвечает концепциям и эмпирической базе действующих норм СП 24. Адекватной актуализации такой разработки будет посвящена следующая работа авторов.

В труде [24] альтернативно пренебрегают работой грунта на сжатие под нижним концом сваи, т.е. принимают $P = P_1$ ($P_b = 0$) и считают осадку сваи s обусловленной в основном сдвиговыми деформациями окружающего грунтового массива, определяя ее от полной нагрузки. Видимо, этот способ пригоден при величинах P , при которых не достигается составляющая обычно порядка 10–20 мм, так называемая сдвиговая осадка [23, 25], и пята сваи не вступает в работу. В этих условиях заявленный [24] учет нелинейности (упругопластичности) сдвиговых де-

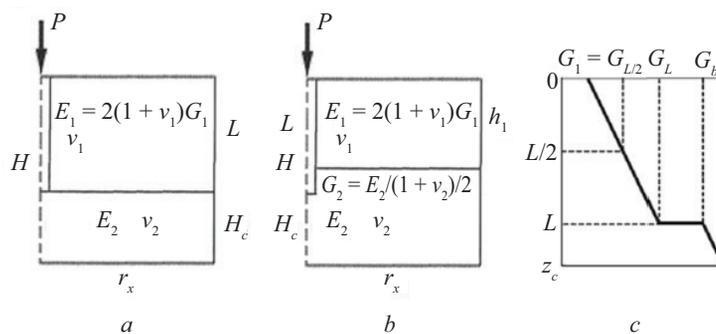


Рис. 1. Двухслойная свайная ячейка: а — расчетная; б — типовая проектная; с — грунт Гибсона

Fig. 1. Two-layer pile cell: a — calculated; b — typical design; c — Gibson soil

формаций вмещающего сваю грунта представляется не актуальным.

В данной статье исследованы рекомендованные для применения при проектировании свайных фундаментов упрощенных методов расчета осадки одиночной сваи СП 24 и [1–3], выполнено сопоставление результатов, определен ряд противоречий и существенные отличия результатов в зависимости от параметров свай и грунтового основания. Для преодоления выявленных противоречий был проведен анализ и актуализировано аналитическое решение [2, 9], разработаны его альтернативные структурные и частные формы. На базе сопоставлений установлена область применения решений, обеспечивающая надежность и согласованность результатов расчетов с теоретической основой (теорией упругости). Инженеры-геотехники могут учитывать полученные результаты при применении указанных упрощенных методов, а также использовать разработанные рекомендации и актуальные решения при проектировании свайных фундаментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье актуализируется упомянутое в сотнях научных публикаций аналитическое решение [2, 9] для расчета осадки одиночной сваи, основанное на телескопической модели сдвига грунта вокруг вдавливаемой сваи. Исследование и оценка ограничений рекомендованной для проектирования редакции этой методики [2] выполнены на основе анализа принятых гипотез, корректности вывода расчетных формул и сопоставлений упрощенных линейных расчетов по СП 24 и [1–3] между собой, а также с результатами численных [13, 17–22] и аналитических [26] расчетов по теории упругости.

Все сопоставления и оценки производились для свай, работающих по боковой поверхности и пяте (см. рис. 1, а), во встречающихся в современном строительстве диапазонах относительной: длины свай $L/d = 5–100$; жесткости ее ствола $K = E_p/E_1 = 100–10\,000$ (где E_p — модуль упругости сваи; E_1 — осредненный в пределах L модуль деформации окружающего грунта) и показателя неоднородности грунтового основания $E_1/E_2 = 0,01–100$ (где E_2 — осредненный модуль деформации расположенных ниже пяты сваи грунтов). Для коэффициента Пуассона ν грунтов принималось $\nu_1 = \nu_2 = \nu$. С учетом этого $g_{12} = G_1/G_2 = E_1/E_2$ (где G — модуль сдвига).

1. Характеристика упругого расчета осадки одиночной сваи [3]

Согласно разделу 5.3 [3] осадка одиночной сваи рассчитывается по безразмерному коэффициенту осадки I_d , представленному формулой:

$$I_d = \frac{sE_1d}{P} = I_0R_KR_\nu R_b, \quad (1)$$

где I_0 — коэффициент осадки для абсолютно жесткой сваи в упругом однородном E_1 полупространстве

с $\nu = 0,5$; R_K — поправочный коэффициент на сжимаемость ствола E_p/E_1 ; R_ν — то же для учета $\nu < 0,5$; R_b — то же на показатель неоднородности грунтового основания E_1/E_2 (при $E_1 = E_2$, но наличии жесткого подстилания на глубине h ниже уровня пяты сваи, вместо R_b используется коэффициент R_h).

Подобное выражение представлено в работе [3] и для расчета доли нагрузки P_b/P , передаваемой на упругий массив пятой сваи:

$$\frac{P_b}{P} = \beta_0 C_K C_b C_\nu, \quad (2)$$

где β_0 — доля осевой нагрузки для несжимаемой сваи в однородном полупространстве ($\nu = 0,5$); C_K — поправочный коэффициент на сжимаемость сваи; C_b — то же на неоднородность грунта E_1/E_2 ; C_ν — то же на $\nu < 0,5$.

Входящие в выражения (1) и (2) коэффициенты определяются по графическим номограммам, разработанным авторами [3] в 1968–1972 гг. численными расчетами по модели упругого однородного и двухслойного полупространства. С учетом очевидно ограниченных возможностей ЭВМ того периода расчеты велись при крупной (до 10–20 слоев элементов), а в МКЭ и с небольшими размерами расчетной области.

2. Характеристика методики расчета осадки одиночной сваи СП 24

Согласно разделу 7.4 СП 24 (гл. 4.7 [1]) коэффициент I_{sL} осадки s свай с $L/d \geq 5$ (в СП 24 и $\kappa = G_1/G_2 \cdot L/d \geq 7,5$):

$$I_{sL} = \beta = \frac{sG_1L}{P} = \left(\frac{\beta'}{\lambda_1} + \lambda_2 \frac{1 - \beta'/\alpha}{\chi} \right), \quad (3)$$

где P — вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю; λ_1 — параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола и определяемый по формуле:

$$\lambda_1 = \frac{2,12\chi^{3/4}}{1 + 2,12\chi^{3/4}},$$

$\chi = EA/G_1L^2$ — относительная жесткость сваи; $EA = E_p\pi d^2/4$ — жесткость ствола сваи на сжатие; λ_2 — корректирующий коэффициент, равный 0,5 в редакции СП 24 и 1,0 в труде [1]; $\beta' = 0,17\ln(k_v\kappa)$ — коэффициент осадки, соответствующий абсолютно жесткой свае ($EA = \infty$); $\alpha' = 0,17\ln(k_{v1}L/d)$ — тот же коэффициент для случая однородного основания с характеристиками G_1 и ν_1 ; $k\nu$, k_{v1} — коэффициенты, определяемые соответственно при $\nu = (\nu_1 + \nu_2)/2$ и при $\nu = \nu_1$ по формуле:

$$k_\nu = 2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2.$$

Как отмечалось выше, решение (2) получено на основе аналитической аппроксимации результатов численных (метод фиктивных сил, являющийся одним из вариантов метода потенциала) [7, 8] расчетов по модели упругого однородного и двухслойного

(с E_1, ν_1, E_2, ν_2) полупространства. В исследовании [13] решение (2) подтверждено численными расчетами по МКЭ применительно к упругому однородному и двухслойному грунту на несжимаемом основании посредством использования расчетной цилиндрической ячейки с $r_x > 10L$ и $H = 1,5L$ ($H_c = L/2$).

3. Характеристика метода расчета осадки одиночной сваи [2]

Согласно разделу 4.2 [2] для свай, в грунтах, где возможно скачкообразное и линейное возрастание с глубиной модулем сдвига (рис. 1, с):

$$I_{sd} = I_{sl} \frac{G_L d}{G_1 L} = \frac{s G_L d}{P} = 1 + \frac{8\eta}{\pi\lambda(1-\nu)\xi} \frac{\tanh(\mu L) L}{\mu L} \frac{L}{d}; \quad (4)$$

$$= \frac{2\eta}{(1-\nu)\xi} + \frac{2\pi\rho \tanh(\mu L) L}{\zeta \mu L} \frac{L}{d};$$

$$\frac{P_b}{P} = \left[\cosh(\mu L) + \frac{\pi\rho(1-\nu)\xi \sinh(\mu L) L}{\zeta\eta \mu L} \frac{L}{d} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $\eta = d_b/d$ — коэффициент размеров пяты (уширения) сваи; $\lambda = E_p/G_L$ (далее будет показано, что теоретически верно $\lambda = E_p/G_1$); $\xi = G_L/G_b$; $\rho = G_1/G_2$; $\mu L = L/d$; $\sqrt{8/(\zeta\lambda)} = \sqrt{2\pi/(\zeta\chi)}$; $\zeta = \ln(2r_m/d)$; r_m — максимальный радиус, на котором предполагается, что осадки в грунте становятся пренебрежимо малыми, определяемый по формуле:

$$r_m = 2,5[0,1 + (\rho - \rho_\nu - 0,1)\xi]L. \quad (6)$$

При $\rho = 1$ ($G_1 = G_2$) и $G_b = G_2$ ($\xi = G_L/G_b = G_1/G_2$) эта модель [2] (рис. 1, с) сводится к двухслойной ячейке (рис. 1, а).

4. Анализ обоснования решения (3), его альтернативные структурные и частные формы

Решение (4) [1] представляет собой обобщение выражений, выведенных для случая $\xi = 1$ в [9] на основе условий размерности и результатов интегрального анализа результатов численных (МКЭ) расчетов в упругой ячейке (см. рис. 1) при $r_x = 25d$ и $H_c = 1,5L$. Этот анализ, так же как выводы выполненных ранее упругих расчетов [27, 28] и экспериментальных исследований [29, 30], свидетельствует о схеме телескопического сдвига грунта вокруг одиночно загружаемых вертикальной нагрузкой длинных (с $L/d \geq 10$ [11]) свай. В этой схеме свая рассматривается как окруженная концентрическими цилиндрами грунта с распределенными по их поверхности касательными напряжениями. Данная предложенная изначально [30] модель концентрического цилиндра (МКЦ) передачи нагрузки свайей на грунт рассматривает взаимодействие сваи и грунта вдоль ствола и у основания как независимые пружины. В публикации [9] было показано, что в МКЦ жесткость упругих пружин, выраженная как гради-

ент локальных кривых передачи нагрузки, может быть соотнесена с модулем сдвига грунта с помощью коэффициентов передачи нагрузки.

В частности, для достижения вертикального равновесия величина напряжения сдвига на каждом цилиндре должна уменьшаться обратно пропорционально площади поверхности цилиндра. Записывая напряжение сдвига на стволе сваи как τ_0 , напряжение сдвига в радиусе r (для сваи радиуса $r_0 = d/2$) определяется как $\tau = \tau_0 r_0/r$. Поскольку деформация вокруг сваи в основном связана со сдвигом, решение разработано в терминах модуля сдвига G и коэффициента Пуассона ν , а не модуля Юнга E (при этом модуль сдвига связан с модулем Юнга E упругим выражением $G = E/2/(1 + \nu)$). Таким образом, деформация сдвига γ в грунте, окружающем сваю, может определяться через $\gamma = \tau/G_1$. Так как основная деформация в грунте будет вертикальной, деформация сдвига может быть записана как $\gamma \sim dw/dr$, где w — вертикальное перемещение. Эти отношения дают:

$$w(z, r) = w_0 \log(r_m/r); \quad (7)$$

$$w_0(z) = \zeta \tau_0(z) r_0/G_1, \quad (8)$$

где w_0 и τ_0 зависят от z — глубины рассматриваемой точки боковой поверхности сваи.

Определяемый выражением (5) важнейший параметр ζ телескопической модели основан на калибровке [9] сравнением с результатами численных расчетов по строгой упругой модели вмещающего абсолютно жесткую сваю полупространства. Согласно п. 7.4.4 СП 24 аналогичный по методологии коэффициент телескопической деформации определяется на основе методики п. 1.2 как $\zeta = \ln(k_\nu k)$, что соответствует несколько меньшим величинам r_m , чем определяются по выражению (5). Способ сближения результатов расчетов методом [2] с СП 24, а также его использования для коротких (с $L/d < 10$ [11]) свай, посредством модификации выражения (5) представлен ниже. После определения тем или другим методом осадки сваи w_0 как расположенной одиночно зависимость (7) позволяет очень просто пересчитывать осадку с учетом группового эффекта (влияния от нагружаемых соседних свай).

Вывод определяющего уравнения (4) приведен в исследовании [9] для случая $\rho = 1$ и $\xi = 1$ на основе выражения (8) с привлечением дифференциальной зависимости между перемещениями $w(z)$ сжимаемого ствола сваи (упругого стержня) и продольной силой в сечении сваи $N(z)$:

$$\frac{\partial w(z)}{\partial z} = \frac{-N(z)}{EA}, \quad (9)$$

и уравнения равновесия:

$$\frac{\partial N(z)}{\partial z} = -2\pi r_0 \tau_0(z). \quad (10)$$

Дифференцируя выражение (7) с учетом (6) и (8), получаем:

$$\frac{\partial^2 w(z)}{\partial z^2} = \frac{2\pi G_1}{\zeta EA} w(z) = K_1 w(z). \quad (11)$$

Решением этого дифференциального уравнения второго порядка является гиперболическая функция:

$$w(z) = A \exp(\mu z) + B \exp(-\mu z), \quad (12)$$

в которой $\mu^2 = K_1$.

С учетом $E_p = EA/(\pi r_0)^2$ в работе [9] введено эквивалентное выражение $\mu^2 = 2/\zeta\lambda/(r_0)^2$, в котором $\lambda = E_p/G_1$. Однако в выражении (4) [2] используется $\lambda = E_p/G_L$. Очевидно, что при линейном возрастании модуля сдвига грунта с глубиной (рис. 2) для теоретически корректного описания упругого взаимодействия сваи и грунта в уравнении (11) (а значит и в (4)) корректно применять $\lambda = E_p/G_1$.

В публикации [9] приводящие к расчетной формуле (4) определяющие выражения для констант A и B (12) найдены в два этапа. На первом путем постановки двух граничных условий на одном и том же нижнем конце сваи они были определены с точностью до одного параметра. В курсе высшей математики такое определение называется решением (11) как задачи Коши [31], что требует привлечения дополнительного условия и, как правило, приводит к более громоздкому виду расчетной функции.

Первое условие использует формулу Буссинеска для круглого штампа на поверхности упругого полупространства [32]:

$$s_d = \frac{P_d(1-\nu)}{4r_d G}, \quad (13)$$

где s_d и P_d — осадка штампа и реакция на него грунта; r_d — радиус штампа.

Модифицируя выражение (13) вводом коэффициента η_s (в [2] $\eta_s = \eta = d_b/d$, а в [9] в качестве аналогичного по смыслу коэффициента используется коэффициент в числителе) и переходя от G_b к E_b (чтобы подчеркнуть, что под пятой сваи основным является деформация сжатия грунта), в исследованиях [2, 9] фактически принято:

$$s_b = w_{z=L} = \frac{P_b(1-\nu)}{2G_b d\eta_s} = \frac{P_b(1-\nu^2)}{E_b d\eta_s}. \quad (14)$$

В работе [9] отмечается принципиальная возможность учета в коэффициенте типа η_s влияния факторов, определяющих условия работы пяты, таких как отличие ее формы от круговой и не учитываемое поверхностной зависимостью (13) влияние заглубления пяты в упругое полупространство. Из-за противоречивости данных об этом влиянии в публикации [9] принято $\eta_s = 1$, а в выражении (4) [2] $\eta_s = \eta = d_b/d$. Эти величины предполагают работу пяты как круглого гладкого поверхностного штампа.

Более подробное обсуждение учета условий работы пяты посредством η_s представлено ниже.

Второе граничное условие [9] следует из выражения (9):

$$\left(\frac{dw}{dz}\right)_{z=L} = \frac{-P_b}{EA} = \frac{-P_b}{\pi r_0^2 \lambda G_1}. \quad (15)$$

Таким образом, условия (14) и (15) содержат неизвестную еще величину грунта — упругую реакцию грунта под пятой сваи. Однако получаемые [9] по уравнениям (9) и (12) аналитические выражения пропорциональны P_b и P_b исключается для отношения этих выражений, в частности, $N(z)/w(z)$ не зависит от P_b .

Таким образом, решение (12) найдено в труде [9] с двумя граничными условиями на нижнем конце сваи (14) и (15), с дополнительным привлечением отношения (9) и (12), в частности, в уровне головы сваи $z = 0$.

Однако найти эквивалентное решение (12) можно и более просто, используя обычный подход в один этап, с постановкой по одному граничному условию на каждом торце сваи в качестве условия на верхнем торце (в голове) сваи, где известна заданная нагрузка P :

$$P = N_{z=0} = -EA \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=0} = -\pi r_0^2 \lambda G_1 \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=0}. \quad (16)$$

Более общее и корректное решение задачи получим, записав на нижнем торце (пяте) сваи граничное условие относительно ее коэффициента постели (Винклера):

$$K_b = \frac{N_{z=L}}{w_{z=L}} = -EA \frac{(\partial w/\partial z)_{z=L}}{w_{z=L}} = -\pi r_0^2 \lambda G_1 \frac{(\partial w/\partial z)_{z=L}}{w_{z=L}}. \quad (17)$$

При этом величина K_b для пяты сваи определяется по выражению (14):

$$K_b = \frac{2G_b d\eta_s}{1-\nu_b} = \frac{E_b d\eta_s}{1-\nu_b^2}. \quad (18)$$

Граничные условия (16) и (17) с учетом (18) дают следующее решение дифференциального уравнения (12):

$$I_{sl} = \frac{sG_1 L}{P} = \psi \frac{k' \exp(2\mu L) + 1}{k' \exp(2\mu L) - 1}; \quad (19)$$

$$P_{bo} = \frac{P_b}{P} = \frac{k' - 1}{k' \exp(\mu L) - \exp(-\mu L)}, \quad (20)$$

где $\psi = \frac{\zeta \mu L}{2\pi}$; $k' = \frac{K_b + \mu EA}{\mu EA - K_b}$.

При $K_b = 0$ ($G_b = 0$, $k' = 1$), что соответствует «выключению» пяты из-за отсутствия ее контакта с грунтом (из-за сохранения рыхлого шлама под пятой буронабивной сваи или в случае отсутствия сцепления с пятой грунта или его нулевым сопро-

тивлением растяжению при выдергивании сваи), выражение (19) упрощается до:

$$I_{sL} = I_{sLa} = \psi / \tanh(\mu L), \quad (21)$$

что совпадает с уравнением (4) при $\eta = 0$ с учетом $\rho = G_1/G_L$.

Для опирающейся пятой на абсолютно жесткую скалу сваи-стойки ($\xi = 0$) $K_b = \infty$ ($k' = -1$) выражение (19) упрощается до:

$$I_{sLa} = I_{sL} = \psi \tanh(\mu L), \quad (22)$$

что совпадает с решением [33], а (20), так же как (6), при $\eta = \infty$, до:

$$P_{bo} = 1 / \cosh(\mu L). \quad (23)$$

Несмотря на функциональное отличие выведенной здесь основной аналитической формулы (19) от полученного ранее выражения (4) [2, 9], при применении корректного выражения параметра относительной сжимаемости сваи, в частности $\lambda = E_p/G_1$, а не $\lambda = E_p/G_L$ [2], результаты расчетов по выражениям (4) и (19) фактически совпадают. Относительная разница в результатах для свай со средним значением $\lambda = 1000$ при $L/d = 5-100$ и $G_1/G_2 = 0,01-2$ составляет величину порядка 10^{-14} . Это обозначает математическую эквивалентность уравнений (4) и (19). С учетом этого телескопическое решение о взаимодействии сваи с грунтовым массивом далее будем обозначать как (4/19).

Сопоставление показывает, что за счет применения $\lambda = E_p/G_L$ [2] вместо $\lambda = E_p/G_1$, уменьшение подсчитанных по выражению (4) осадок для свай с $L/d = 100$ достигает 30 %.

Выведенная структурная форма (19) этого решения показывает, что в интервале $k' = [-1; 1]$ ($1 < k' > -1$) вдавливаю сваи соответствует расчетное растяжение пяты сваи ($P_{bo} < 0$) подстилающим ее упругим грун-

том. Этому интервалу k' соответствует лишь $K_b < 0$, а при использовании формулы (19) он заведомо не применяется. Это исключает ситуацию, когда телескопическое решение предполагает наличие у дисперсного грунта сопротивления растяжению и адгезии (сцепления) этого грунта с пятой сваи. Таким образом, телескопическое решение исключает работу грунта на растяжение, которую в некоторых случаях, например, при коротких сваях в области их пяты, прогнозируют численные расчеты по теории упругости [27]. При концентрации нагрузки в нижней части сваи расчетное растяжение грунта отмечается и в периферийных зонах окружающего сваю упругого массива.

В работе [12] предложено использовать вытекающее из уравнения (4) выражение, записанное относительно коэффициента постели (Винклера) одиночной сваи $K = P/s$:

$$\bar{K} = \frac{K}{\mu EA} = \frac{\bar{K}_b + \tanh(\mu L)}{1 + \bar{K}_b \tanh(\mu L)}, \quad (24)$$

где $\bar{K}_b = \frac{K_b}{\mu EA}$.

Путем несложных преобразований можно показать, что выражение (24) эквивалентно и (19). Форма (24) демонстрирует, что произведение жесткости идеальной сваи-стойки ($\bar{K}_b = \infty$, $\bar{K} = \coth(\mu L)$) и жесткости идеальной сваи-трения ($\bar{K}_b = 0$, $\bar{K} = \tanh(\mu L)$) той же длины равно квадрату жесткости бесконечно длинной сваи $\bar{K} = \bar{K}_b = 1$. Это замечательное свойство означает, что $\bar{K} = \bar{K}_b = 1$ является геометрическим средним кривых \bar{K} для $\bar{K}_b = \infty$ и $\bar{K}_b = 0$ от μL .

С учетом этого для сваи со стволом, расположенным в произвольном по отношению к уровню пяты сваи двухслойном грунте (см. рис. 1, б), получено достаточно простое выражение для жесткости K , а значит, и осадки сваи [12]:

$$I_{sL} = \frac{sG_1L}{P} = \frac{G_1L}{K} = \psi \frac{\mu_1 EA + K_b \tanh(\mu_2 h_2) + [K_b + \mu_2 EA \tanh(\mu_2 h_2)] \tanh(\mu_1 h_1)}{[\mu_1 EA + K_b \tanh(\mu_2 h_2)] \tanh(\mu_1 h_1) + K_b + \mu_2 EA \tanh(\mu_2 h_2)}, \quad (25)$$

где $h_2 = L - h_1$; μ_1 и μ_2 рассчитываются с применением модуля сдвига грунт а на соответствующем участке сваи при $\xi = 1$.

Можно легко убедиться, что при $h_1 = 0$ уравнение (25) сводится к уравнению (24) для однородного грунта с $\mu = \mu_2$, а $h_2 = 0$ ($h_1 = L$) соответствует двухслойному грунту (рис. 1, б) с $\mu = \mu_1$. Отметим, что схема на рис. 1, б является наиболее рациональной при классическом применении свай с заглублением их нижней части в подстилающий более слабую покровную толщу несущий слой грунтового основания.

Рассмотрим использование в решении (4/19) коэффициента η_s для учета условий работы пяты сваи, в частности влияния ее размеров, формы, неоднородности подстилающего грунта и заглубления, а также способа устройства и вида грунта. Для воз-

можности комплексного учета различных факторов представим следующую зависимость:

$$\eta_s = \prod_{i=0}^n \eta_i = \eta_0 \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n, \quad (26)$$

где η_i — коэффициент влияния i -го фактора, определяющего условия работы пяты.

При $\eta_s = 1$ зависимость (18) совпадает с (13). Для учета способа устройства сваи и вида грунта целесообразно принять $\eta_0 = \gamma_c \gamma_{cr}$, где γ_c и γ_{cr} — нормативные коэффициенты СП 24 (табл. 7.4 или п. 7.2.6).

Рассмотрим факторы, приводящие к другим компонентам η_s , выделим четыре основных фактора и приведем рекомендации по их назначению.

Коэффициент η_2 влияния прямоугольной формы пяты в зависимости от отношения сторон l/b

Coefficient η_2 of influence of rectangular shape of heel depending on the ratio of sides l/b

l/b	1	2	3 "	4 "	5 "
η_2	0,99	0,97	0,94	0,91	0,87

Отличие диаметра d_b (площади) пяты сваи от диаметра d ее ствола учитывает зависимость [2] $\eta_1 = \eta = d_b/d$. По причинам, указанным выше, при выдерживающей нагрузке или присутствии под пятой буровой сваи рыхлого шлама $\eta_1 = 0$.

Представленные в таблице величины коэффициента η_2 для учета отличия прямоугольного сечения пяты баретной сваи от соответствующего $\eta_2 = 1$ круга получены по данным обобщения (13) [32] Шлейхером [34] на штампы прямоугольной формы. Если для обычной квадратной забивной сваи $\eta_2 = 0,99 \approx 1$, то для применяемых для баретных свай прямоугольных сечений с соотношением сторон 1:5 имеем $\eta_2 = 0,87$.

Учет фактора наличия на некоторой глубине под пятой жесткого подстилания приведен в труде [12]. По данным решений теории упругости для штампа на упругом слое [35] $\eta_3 = 1 + 0,65d_b/H_c$, где H_c — толщина упругого слоя под пятой.

Как указывалось выше, влияние линейного возрастания с глубиной жесткости подстилающего пяту грунта Гибсона было приближенно учтено в работе [9] при разработке формулы для коэффициента ζ . Альтернативное исследование этого фактора с использованием представленных в публикации [36] формул для коэффициента Винклера такого грунта подтвердили адекватность учета [2, 9].

Рассмотрим подробнее проблему учета [2, 9] фактора η_4 — влияния заглубления пяты в упругое полупространство. По результатам упомянутого выше анализа в [2, 9] принято $\eta_4 = 1$. Согласно ГОСТ 20276.1⁵ на определение модуля деформации грунта в случае заглубленного винтового штампа $\eta_4 = 1 - 1,4$ с $\eta_4 = 1,4$ при $L/d_b \geq 5$. Такие повышающие сопротивления грунта η_4 вытекают из решений, полученных интегрированием формулы Миндлина [37] для сосредоточенной силы, приложенной внутри однородного упругого полупространства. Отметим зависимости для осадки под заглубленной нагрузкой, равномерно распределенной по площади круга [38, 39] и прямоугольника [40]. Однако при применении таких решений следует учитывать, что анализ описывающей упругое поведение грунта величины η_4 должен проводиться с учетом совместного влияния жесткостных параметров сваи и неоднородности основания.

С этой целью рассмотрим вариации параметра η_4 с использованием результатов выполненных упругих расчетов осадки и реакций пяты одиночных свай с применением выражений (1) и (2) [3], а также

по результатам проведенных в рамках настоящего исследования численных (МКЭ) расчетов по Плакисис [41]. В частности, использовалась моделирующая вмещающее сваю упругое полупространство (УПП), разбитая на мелкие (very fine) 15-узловые конечные элементы, расчетная область с $r_x = 10L$ и $H = 6L$ (см. рис. 1).

На рис. 2 представлены подсчитанные этим способом графики изменения величины η_4 в зависимости от относительных длины L/d и показателя g_{12} неоднородности грунтового массива для абсолютно жесткой (рис. 2, а) и сжимаемой (рис. 2, б) свай. Для сопоставления на рис. 2 приведены также величины η_4 теоретических решений для гладкого [32] и сцепленного [42] штампов на поверхности ($L/d = 0$) однородного ($g_{12} = 1$) полупространства.

Данные рис. 2 показывают очевидную значительную погрешность расчетов по выражениям (1) и (2) [3]. Как отмечалось в п. 1, это может объясняться ограниченной точностью выполненных на рубеже 70-х гг. численных расчетов на ЭВМ. Другая серьезная причина математическая — произведение нескольких коэффициентов неизбежно ведет к увеличению диапазона погрешностей, так как погрешности каждого параметра умножаются. Особенно грубые погрешности в формулах (1) и (2) могут дать коэффициенты неоднородности R_b и C_b . Об этом свидетельствуют и представленные на рис. 2, б результаты численных расчетов по модели УПП Плакисис [41]. Эти данные демонстрируют качественное различие между результатами [3] и [41] для двухслойного основания и их сходимость в однородном случае, что свидетельствует о том, что полученные по выражениям (1) и (2) величины η_4 в промежуточном диапазоне $l/d = 10-25$, $E_1/E_2 = 0,1-0,5$ могут являться ошибочными (техническими «отскоками»), а действительные значения находятся в промежутке между данными при $l/d < 10$ и $l/d > 25$ примерно в диапазоне $\eta_4 = 0,55-0,9$. Учитывая структуру зависимости (14) и решения (4/19), запас надежности расчета осадки в практически значимых диапазонах l/d и E_1/E_2 обеспечивает величина $\eta_4 = 0,5$. Эта величина означает, что в результате взаимовлияния между нагрузками, передаваемыми пятой и боковой поверхностью сваи, податливость под пятой выше, чем для штампа на поверхности упругого полупространства [32, 42]. В свою очередь, принятая в работах [2, 9] величина $\eta_4 = 1$ предполагает равенство этих податливостей. В обоих случаях $\eta_4 \leq 1$ и в (4/19) исключается работа расположенного выше пяты сваи упругого массива на растяжение.

Структура выражений (19)–(23) позволяет подобно применению η_4 для пяты учесть влияние условий

⁵ ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. М. : Стандартинформ, 2020. 14 с.

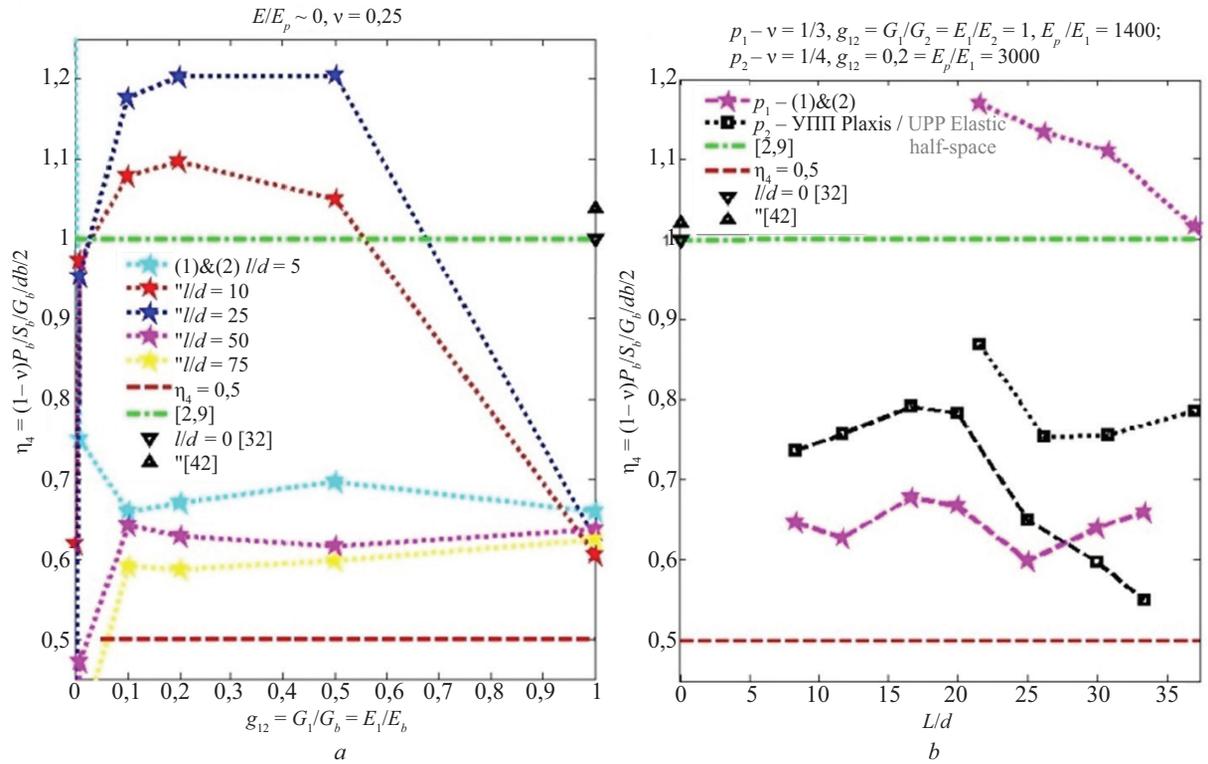


Рис. 2. Анализ влияния неоднородности упругого полупространства и жесткости сваи на условия работы грунта у пяты сваи: *a* — абсолютно жесткая свая $E_1/E_p \approx 0, \nu = 1/3$; *b* — упругие сжимаемые сваи p_1 с $\nu = 1/3, g_{12} = G_1/G_2 = E_1/E_2 = 1, E_p/E_1 = 1400, E_1 = 17$ МПа и p_2 с $\nu = 1/4, g_{12} = 0,2, E_p/E_1 = 3000, E_1 = 8$ МПа

Fig. 2. Analysis of the influence of heterogeneity of the elastic half-space and pile rigidity on the working conditions of the soil at the pile heel: *a* — absolutely rigid pile $E_1/E_p \approx 0, \nu = 1/3$; *b* — elastic compressible piles p_1 with $\nu = 1/3, g_{12} = G_1/G_2 = E_1/E_2 = 1, E_p/E_1 = 1400, E_1 = 17$ MPa and p_2 with $\nu = 1/4, g_{12} = 0,2, E_p/E_1 = 3,000, E_1 = 8$ MPa

работы сваи по боковой поверхности посредством коэффициента α_s . В частности, принимая $\mu^2 = \alpha_s K_1$, где K_1 определено в выражении (9). Уточнение величин компонентов является задачей дальнейших исследований. В первом приближении целесообразно принять $\alpha_s = \alpha_0 = \gamma_c \gamma_{cf}$, где γ_c и γ_{cf} — нормативные коэффициенты СП 24 (табл. 7.4 или 7.6).

5. Оценка применимости основанных на теории упругости расчетных зависимостей

Представленные выражения (4/19) основаны посредством калибровки на телескопической модели деформации вмещающего сваю упругого полупространства. Привлечение теории упругости обуславливает присущие ей недостатки. В частности, игнорирование ограниченной возможности дисперсного грунта работать на растяжение и завышение распределительной способности грунтового массива. Выше на основе анализа структурной формы (19) телескопического решения было показано, что оно исключает работу грунта на растяжение.

Высокая распределительная способность упругого массива не согласуется с фиксируемой в опытах концентрацией напряжений и деформаций в примыкающих к месту приложения нагрузки (контактной поверхности) областях грунта. В российской практике проектирования фундаментов учет этого обстоя-

тельства на настоящем этапе выполняется хорошо зарекомендовавшим себя методом расчета на основе инженерной модели осадок фундамента мелкого заложения, а также условного фундамента СП 24, в частности, способом СП 22 ограничения сжимаемой толщи грунтового основания H_c , в пределах которой под подошвой фундамента интегрируется расчетное сжатие от вертикальных нормальных напряжений σ_{zq} . Способ основан на данных экспериментов и натурных наблюдений. Как впервые показано в работе [43], распределение вертикальных перемещений грунта по глубине в принципе отличается от расчетного по теории УПП. В то же время распределение сонаправленных нагрузке вертикальных напряжений, особенно в основаниях с постепенно возрастающей с глубиной жесткостью или при слоистости E_1/E_2 порядка 0,5–5, хорошо качественно и близко количественно соответствует рассчитанной по УПП [44]. Основная часть суммарного сжатия основания, т.е. осадки, концентрируется в верхней части основания фундамента толщиной $H_0 \approx b/2$ (b — ширина фундамента). С ростом нагрузки толщина этой зоны может возрастать. Для обеспечения сходимости с опытными данными в СП 22 нижнюю границу сжимаемой толщи определяют как глубину $Z_c \geq H_0$, на которой рассчитан-

ное по УПП вертикальное напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{zq} \leq 50\%$ (для грунтов с $E > 7$ МПа) бытового давления (эффективного напряжения в грунте до начала строительства) σ_{zg} . При этом деформации сжатия рассчитываются по напряжениям σ_{zq} по компрессионной (одометрической) схеме с коэффициентом Пуассона $\nu \approx 0,25$.

По расчетным размерам активной зоны грунтового основания в горизонтальном направлении в нормативных документах и справочных руководствах подобные рекомендации отсутствуют. Поэтому анализ этого вопроса выполним применительно к принятой в исследованиях [2, 9] телескопической схеме деформирования грунтового массива вокруг сваи с применением разработанного посредством интегрирования формулы Миндлина [37] упругого решения [26]. Представленные [26] аналитические формулы для расчета компонентов напряжений σ_z , σ_r и σ_θ от распределенных по длине (оси) сваи равномерной и линейно возрастающей с глубиной вертикальной нагрузки позволяют выполнить расчет вертикальных деформации ε_z в однородном грунтовом массиве по формуле обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_z(z, r) = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)). \quad (27)$$

Принимая для расчетной области $r_x = 3,75L$, $H = 2,5L$ и интегрируя расчетные $\varepsilon_z(z, r)$, исследовано распределение вертикальных перемещений грунта в околосвайном массиве (рис. 3).

Учитывая принцип Сен-Венана, рассчитанный с использованием формул [26] и интегрирования (27) НДС грунта может считаться полностью представительным в областях расчетной области, расположенных на некотором удалении от ее границ и сваи. Ограниченный на рис. 3 двумя горизонтальными штриховыми линиями диапазон изменения величины Z_c определялся с учетом возможного изменения удельного веса грунтов в пределах от 10–20 кН/м³ и глубины заложения пяты сваи от 5 до 50 м.

Данные рис. 3 иллюстрируют, что при расчете r_m по выражению (7) и выборе $H_c = r_m/2$ расчетная ячейка (см. рис. 1) ограничивает зону, в которой концентрируется около 90% вызванной нагружением сваи деформации упругого грунтового массива. При этом определяемая эмпирическим СП 22 правилом глубина Z_c сжимаемой части расчетной области не превышает $L + r_m/2$. Этот анализ подтверждают выводы [2] о том, что определяемые по формуле (7) r_m хорошо согласуются с эмпирическими данными, согласно которым r_m представляет собой величину порядка L . Таким образом, выполненный анализ свидетельствует

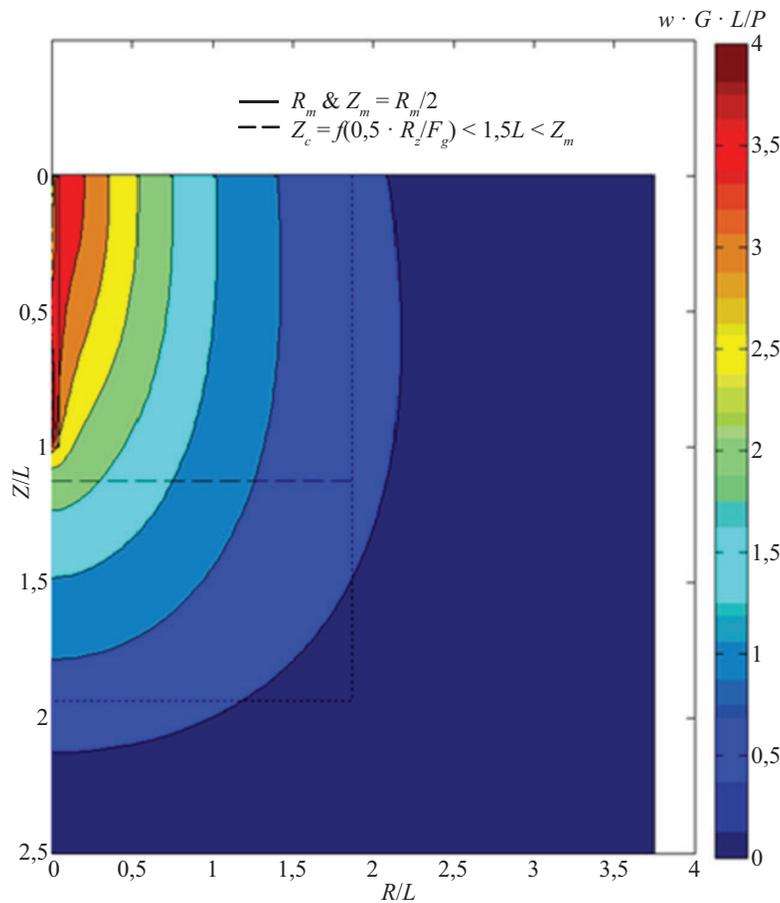


Рис. 3. Распределение вертикальных перемещений в околосвайном массиве

Fig. 3. Distribution of vertical soil movements in the pile massif

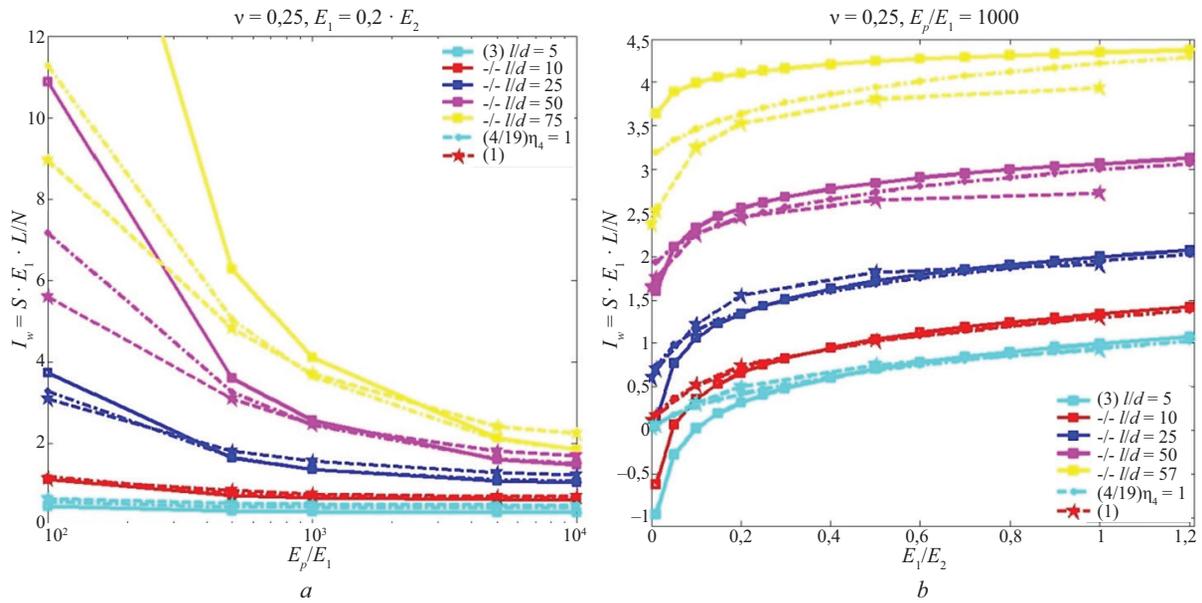


Рис. 4. Сопоставление результатов расчетов по решениям (1), (3) и (4/19): сплошные линии — расчет по зависимости (3) СП 24; пунктир — расчет по зависимости (4) [2, 9], эквивалентной выведенной в настоящей статье зависимости (19); штриховые линии — расчет по зависимости (1) [3]; цвет линий в зависимости от относительной длины свай L/d

Fig. 4. Comparison of calculation results for solutions (1), (3) and (4/19): solid lines — calculation for dependence (3) SP 24; dotted line, dashed line — calculation for dependence (4) [2, 9] equivalent to dependence (19) derived in this paper; dashed lines — calculation for dependence (1) [3]; line colour depending on the relative pile length L/d

о применимости решения (4/19) для описания работы свай в упругом массиве. Отметим также, что применение в публикации [14] уравнений телескопического сдвига в расчетной цилиндрической ячейке означает необходимость использования ее расчетного радиуса $r_x \geq r_m$.

6. Сопоставление результатов расчетов разными методами

Важно сопоставить результаты нормативной (СП 24) зависимости (3) с аналогичными по теоретической основе актуализированным решением (4/19) и зависимостью (1) [3, 6, 7]. При этих сопоставлениях в решении (4/19) рассматривался случай $\rho = G_1/G_L = 1$, $G_b = G_2$, при котором грунт Гибсона (рис. 1, c) совпадает с двухслойным основанием (рис. 1, a) и результаты расчетов по зависимостям (1), (3) и (4/19) исходя из их единой упругой основы теоретически должны совпадать.

Анализ показывает, что в ряде случаев между результатами наблюдаются значительные отличия, примеры которых представлены на рис. 4.

Особенно сильные отличия наблюдаются при неоднородном основании, в частности при низких g_{12} ($<0,5$) и большой относительной длине свай L/d (>50). При $g_{12} < 0,1$ решение (3) [1] ошибочно прогнозирует выход свай с $L/d < 10$ из основания. Это обусловлено приближенным описанием выражения (3) влияния сжимаемости ствола свай и неоднородности основания. Несколько улучшила эту ситуацию корректировка СП 24 величины коэффициента λ_2 с 1 [1] до 0,5, а так-

же ограничение применения решения (3) с учетом сжимаемости ствола свай условием $\kappa \geq 7,5$.

Сопоставление расчетов по актуализированному решению (4/19) с разработанным по данным рис. 2 $\eta_s = \eta_4 = 0,5$ с обычно используемым на практике исходным [2, 9] $\eta_s = \eta_4 = 1$ при неоднородном основании может увеличивать расчетные осадки до 50 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Как показали расчетные сопоставления п. 6, в целом расчеты по актуальному решению (4/19) дают, очевидно, более реалистичные промежуточные результаты между данными решений (1) [3] и (3) СП 24.

Параметрические исследования показали возможность сближения результатов расчетов по (4/19) и нормативной (СП 24) формуле (3). Для этого условия телескопического сдвига (6) заменяются следующей обобщенной зависимостью:

$$r_m = 2,5d[0,1 + (\rho - \rho v - 0,1)\xi](L/d)^\alpha, \quad (28)$$

в которой введенный дополнительный показатель $\alpha = 1$ соответствует совпадению (28) и (6) [2, 9]. Параметрические расчеты показали, что при $\rho = G_1/G_L = 1$, $G_b = G_2$ (см. рис. 1) наилучшее совпадение результатов (4/19) и (3) СП 24 наблюдается при $\alpha = 0,9$. По сравнению (4/19) решение (3) СП 24 обладает более узким диапазоном применимости, в частности, ограничено СП 24 и [1] условием $L/d \geq 5$ и по струк-

туре решения соотношением параметров $k_{\nu} > 1$. Представленные сопоставления указывают, что эти ограничения (3) должны быть расширены на неоднородные основания с $g_{12} = G_1/G_2 < 0,1$ для свай с $L/d < 10$. Кроме того, в СП 24 и [1] не разработана методика определения приходящейся на пяту сваи нагрузки P_b , выделения параметров сопротивления грунта по боковой поверхности сваи и оценки сжатия ствола сваи. Эти величины не могут быть оценены на основе зависимости (3) с привлечением зависимости для пяты (14), так как разработка (3) в [1, 9] выполнена в предположении сферической формы пяты сваи. По этим причинам (3) не позволяет осуществлять оценку параметров осадок и выхода сваи при отмеченных выше случаях «выключения» пяты из работы из-за присутствия под пятой шлама или выдерживающей нагрузки. Применение формулы (28) при расчетах (4/19) дает возможность преодолевать отмеченные ограничения без принципиального выхода за рамки нормативного выражения (3) СП 24.

В случае очень коротких свай с $L/d < 10$ расхождение с результатами численных упругих расчетов было отмечено в работе [11] и для решения (4). С учетом данных [11] адекватность использования телескопического решения (4/19) для коротких (с $L/d < 10$) свай обеспечивается посредством модификации выражения (6) к следующему виду:

$$r_m = 3,1d[1 - \min(1, 0, 1L/d)] + 2,5L[0,1 + (\rho - \rho\nu - 0,1)\xi]. \quad (29)$$

В формуле (29) первое слагаемое корректирует (6) при $L/d < 10$ и оставляет его без изменения для длинных свай. Применение выражения (29) в решении (4/19) весьма актуально для моделирования группы свай, так называемой эквивалентной сваем [11], у которой, как правило, $L/d \ll 10$.

При проектировании свайных фундаментов необходимо определить допускаемую нагрузку на сваю и ее осадку при этой нагрузке, вызывающую на практике допускаемые рамки упругопластического состояния, вмещающего сваю грунтового массива. Геометрические размеры сваи (диаметр, длина), механические свойства окружающих и подстилающих грунтов оказывают значительное влияние на осадку сваи и должны учитываться адекватной методикой расчета.

Разработанные посредством аппроксимации упругих решений о свае в упругом полупространстве решения (1) [3], (3) [1], (4) [2] и полученное в настоящей работе эквивалентное (4) выражение (19) по существу предназначены для оценки начального линейного сопротивления сваи внешней нагрузке. В частности, определять ее коэффициент жесткости k_z — основной параметр контактных моделей [1, 33], широко применяемых для практических расчетов конструкций свайных фундаментов, в том числе при динамических воздействиях. Выполненный анализ и сопоставления показали, что для определения осадки одиночной сваи и па-

раметра k_z ее линейного сопротивления наиболее обоснованно аналитическое решение (4/19) с применением (29). Простейший вид этого аналитического решения обеспечивает его практическое применение для проектирования свайных фундаментов не только в статических, но и в динамических и реологических задачах [45].

Адекватное определение параметров контактной модели позволяет выполнить по ним надежные и рациональные расчеты конструкций свайных фундаментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Упрощенные решения для расчета осадки одиночных свай востребованы строительной практикой, повышение точности и общности таких решений обеспечивает определение адекватных параметров контактных моделей для разработки надежных и рациональных конструкций свайных фундаментов.

Выполненный теоретический анализ и сопоставление результатов упрощенных методов расчета осадки сваи [1–3, 9], основанных на аппроксимации ее работы в упругом полупространстве, выявил ряд противоречий в зависимости от параметров сваи и грунтового основания. Для преодоления выявленных противоречий была выполнена актуализация упрощенного аналитического решения (4) [2, 9], разработана альтернативная (4) его структурная форма (19), проведены сопоставления, установлена и рекомендована область применения решения (4/19) — оценка начального линейного сопротивления сваи.

Достоинством актуализированного решения (4/19) является четко выделенная доля пяты сваи, что позволяет отдельно оценить работу ее боковой поверхности, в частности, в актуальных задачах с выдерживающей нагрузкой на сваю или по учету «выключения» пяты сваи из-за рыхлого шлама под пятой буронабивной сваи. В этом направлении авторы планируют проведение исследования и разработку решения для повторяющейся (циклической) знакопеременной нагрузки, например, на сваи опор под воздействием ветровых нагрузок или в результате повторяющихся сезонных нагрузок от пучения-оттаивания поверхностных грунтов. Структура выражений (19)–(23) дает возможность учитывать влияние различных факторов на условия работы грунта под пятой сваи и у ее боковой поверхности посредством применения коэффициентов η_s и α_s .

Другой планируемой авторами работой является актуальная разработка упрощенного метода расчета осадки сваи с учетом практической упругопластической работы грунта в диапазоне, допускаемой на сваю нормами СП 24 расчетной нагрузки. Поскольку деформация вокруг сваи преимущественно имеет сдвиговой характер, большой интерес представляет исследование вопроса использования в расчетах, установленных по данным прямых

испытаний грунта на сдвиг, величины его модуля сдвига. Это особенно актуально при учете упруго-пластических эффектов, из-за которых неопределен-

ным образом изменяется упругое соотношение $G = E/2/(1 + \nu)$ между модулями сдвига и Юнга (сжатия) грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федоровский В.Г., Левачев С.Н., Курилло С.В., Колесников Ю.М. Сваи в гидротехническом строительстве : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2003. 238 с.
2. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. Piling Engineering. 3rd ed. CRC Press, 2020. 408 p.
3. Poulos H.G., Davis E.H. Pile Foundation Analysis and Design. Sydney : Rainhom-Bridge Book Co., 1980. 398 p.
4. Tomlinson M.J., Woodward C.J. Pile Design and Construction Practice: 6th ed. London : CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. 574 p.
5. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М. : Стройиздат, 1994. 380 с.
6. Poulos H.G., Davis E.H. The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers // Géotechnique. 1968. Vol. 18. Issue 3. Pp. 351–371. DOI: 10.1680/geot.1968.18.3.351
7. Poulos H.G. Settlement of single piles in non-homogeneous soil // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1979. Vol. 105. Issue 5. Pp. 627–641. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000799
8. Федоровский В.Г. Расчет осадок свай в однородных и многослойных основаниях : дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 198 с.
9. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1978. Vol. 104. Issue 12. Pp. 1465–1488. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000729
10. Randolph M.F., Wroth C.P. An analysis of the vertical deformation of pile groups // Geotechnique. 1979. Vol. 29. Issue 4. Pp. 423–439. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.423
11. Randolph M.F. Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts // Proceeding of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). 1994. Vol. 5. Pp. 61–82.
12. Mylonakis G., Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil // Geotechnique. 1998. Vol. 48. Issue 1. Pp. 55–72. DOI: 10.1680/geot.1998.48.1.55
13. Боков И.А., Федоровский В.Г. Об учете неоднородности грунта по глубине в расчетах осадки свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 4. С. 2–6. EDN QIVGYU.
14. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю. Осадка и длительная несущая способность свай // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 18–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23. EDN HEIXNL.
15. Безволев С.Г. Аналитическое решение для расчета дополнительных осадок свайных полей // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 4 (243). С. 58–65. EDN PCOHRJ.
16. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 3. С. 11–15. EDN KSYPMF.
17. Banerjee P.K., Davies T.G. The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils // Geotechnique. 1978. Vol. 28. Issue 3. Pp. 309–326. DOI: 10.1680/geot.1978.28.3.309
18. Butterfield R., Banerjee P.K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups // Geotechnique. 1971. Vol. 21. Issue 1. Pp. 43–60. DOI: 10.1680/geot.1971.21.1.43
19. Слепак М.Э. Осадки и НДС пластично-мерзлого грунта в основании центрально-нагруженной сваи // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. 1982. С. 154–158.
20. Rajapakse R.K.N.D. Response of an axially loaded elastic pile in a Gibson soil // Geotechnique. 1990. Vol. 40. Issue 2. Pp. 237–249. DOI: 10.1680/geot.1990.40.2.237
21. Lee C.Y., Small J.C. Finite-Layer Analysis of Axially Loaded Piles // Journal of Geotechnical Engineering. 1990. Vol. 117. Issue 11. Pp. 1706–1722. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1991)117:11(1706)
22. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. Piles and Pile Foundations. UK : Spon Press, 2012. 278 p.
23. Готман А.Л., Гавриков М.Д. Расчет длинномерных буронабивных свай на вертикальную нагрузку // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 4. С. 2–8. EDN MSBJDN.
24. Шарафутдинов Р.Ф., Разводовский Д.Е., Закатов Т.С. Инженерный метод прогноза осадки одиночных свай с учетом упругопластического поведения грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 3. С. 7–15. EDN OFOAVE.
25. Савинов А.В. Применение свай, погружаемых вдавливанием, при реконструкции исторической застройки городов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2008. 34 с. EDN NKJRJL.
26. Geddes J.D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading // Geotechnique. 1966. Vol. 16. Issue 3. Pp. 231–255. DOI: 10.1680/geot.1966.16.3.231

27. Барвашов В.А. Расчет на ЭЦВМ осадки свай от вертикальной нагрузки и определение перемещений грунта вокруг свай // Труды 3-й науч.-техн. конф. молодых научных работников НИИ оснований. 1967. С. 20–23.
28. Frank R. Etude theorique du comportement des pieux sous charge vertical; introduction de la dilatance. Paris : France, 1974. 238 p.
29. Cooke R.W. Settlement of friction pile foundations // Proceeding Conference on Toll Buildings. 1974. Pp. 7–19.
30. Coyle H.M., Reese L.C. Load transfer for axially loaded piles in clay // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1966. Vol. 92. Issue 2. Pp. 1–26.
31. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Т. 2. М. : Наука, 1985. 576 с.
32. Boussinesq J. Applications des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. Paris : Gauthier-Villiers, Imprimeur-Libraire, 1885.
33. Scott R.F. Foundation analysis. New Jersey, USA : Prentice Hall, 1981. 545 p.
34. Schleicher F. Zur Theorie des Baugrundes // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1925. No. 5. P. 199; Bauingenieur. 1926. Vol. 48. No. 7. Pp. 931–935; Vol. 49. Pp. 949–952.
35. Giroud J.P. Tables pour le calcul des fondations. Vol. 1: Tassement. Paris : Dunod, 1972. 383 p.
36. Ильичев В.А., Аникьев А.В. Система с полтора степенями свободы как динамическая модель неоднородного основания // Труды института НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. 1987. № 85. С. 30–32.
37. Mindlin R.D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid // Physics. 1936. Vol. 7. Issue 5. Pp. 195–202. DOI: 10.1063/1.1745385
38. Nishida Y. Vertical stress and vertical deformations of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite // Proceedings of the 1st International Society for Rock Mechanics Congress. 1966. Vol. 2. Pp. 493–498.
39. Нгуен Занг Нам. Определение осадки круглого штампа с учетом его заглубления // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и докторантов. 2006. С. 40–43.
40. Знаменский В.В. Работа свайного фундамента в глинистых грунтах и расчет их по деформациям основания : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971. 14 с.
41. PLAXIS 2D-v.9 Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: User Manual. Rotterdam : Balkema, 2008.
42. Моссаковский В.И. Основная смешанная задача теории упругости для полупространства с круговой линией раздела граничных условий // Прикладная математика и механика. 1954. Т. 18. № 2. С. 187–196.
43. Ефремов М.Г., Коновалов П.А., Михеев В.В. К вопросу о распределении послойных деформаций грунта в сжимаемой толще глинистых и песчаных оснований (по материалам полевых испытаний) // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1963. № 6. С. 5–7. EDN XYWMZF.
44. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2000. № 4. С. 10–18. EDN WESCFN.
45. Шарафутдинов Р.Ф., Безволев С.Г. Определение сдвиговой ползучести глинистых грунтов полевыми и лабораторными методами при изысканиях под свайные фундаменты // Российский форум изыскателей : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 271–275. EDN TGREAF.

Поступила в редакцию 9 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 22 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 22 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Григорьевич Алексеев** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований; **Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Научно-исследовательского центра «Строительство» (НИИОСП НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, Рязанский проспект, д. 59; SPIN-код: 9753-4640, РИНЦ ID: 873091, ResearcherID: AAB-8070-2020, ORCID: 0000-0001-6020-0328; adr-alekseev@ya.ru;

Степан Георгиевич Безволев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Научно-исследовательского центра «Строительство» (НИИОСП НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, Рязанский проспект, д. 59; РИНЦ ID: 271303, Scopus: 6602971111; compgeo@ya.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fedorovsky V.G., Levachev S.N., Kurillo S.V., Kolesnikov Yu.M. *Piles in hydraulic engineering : tutorial*. Moscow, ASV Publishing House, 2003; 238. (rus.).
2. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. *Piling Engineering. 3rd ed.* CRC Press, 2020; 408.
3. Poulos H.G., Davis E.H. *Pile Foundation Analysis and Design*. Sydney, Rainhom-Bridge Book Co., 1980; 398.
4. Tomlinson M.J., Woodward C.J. *Pile Design and Construction Practice: 6th ed.* London, CRC Press Taylor & Francis Group, 2015; 574.
5. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. *Forecast of settlement of pile foundations*. Moscow, Stroyizdat, 1994; 380. (rus.).
6. Poulos H.G., Davis E.H. The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers. *Géotechnique*. 1968; 18(3):351-371. DOI: 10.1680/geot.1968.18.3.351
7. Poulos H.G. Settlement of single piles in non-homogeneous soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1979; 105(5):627-641. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000799
8. Fedorovsky V.G. *Rainfall of piles in the uniform and multilayered bases : thesis ... candidate of technical sciences*. Moscow, 1974; 198. (rus.).
9. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division/ASCE*. 1978; 104(12):1465-1488.
10. Randolph M.F., Wroth C.P. An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Geotechnique*. 1979; 29(4):423-439. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.423
11. Randolph M.F. Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. *Proceeding of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*. 1994; 5:61-82.
12. Mylonakis G., Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. *Geotechnique*. 1998; 48(1):55-72. DOI: 10.1680/geot.1998.48.1.55
13. Bokov I.A., Fedorovskii V.G. Taking into account the soil depth inhomogeneity in calculation of the piles settlement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 4:2-6. EDN QIVGYU. (rus.).
14. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Yu. Settlement and long-term bearing capacity of the pile. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 9:18-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23. EDN HEIXNL. (rus.).
15. Bezvolev S.G. Analytical solution for calculating additional settlements of pile fields. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2012; 4(243):58-65. EDN PCOHRJ. (rus.).
16. Fedorovsky V.G., Bezvolev S.G. Method of calculation of pile fields and other vertical reinforced soil masses. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994; 3:11-15. EDN KSYPMF. (rus.).
17. Banerjee P.K., Davies T.G. The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils. *Geotechnique*. 1978; 28(3):309-326. DOI: 10.1680/geot.1978.28.3.309
18. Butterfield R., Banerjee P.K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique*. 1971; 21(1):43-60. DOI: 10.1680/geot.1971.21.1.43
19. Slepak M.E. Rainfall and the VAT of plastic and frozen soil in the basis of the central loaded pile. *Soil Rheology and Engineering Permafrost Science*. 1982; 154-158. (rus.).
20. Rajapakse R.K.N.D. Response of an axially loaded elastic pile in a Gibson soil. *Geotechnique*. 1990; 40(2):237-249. DOI: 10.1680/geot.1990.40.2.237
21. Lee C.Y., Small J.C. Finite-Layer Analysis of Axially Loaded Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990; 117(11):1706-1722. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1991)117:11(1706)
22. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. *Piles and Pile Foundations*. UK, Spon Press, 2012; 278.
23. Gotman A.L., Gavrikov M.D. Calculation of long bored piles for vertical loading. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 4:2-8. EDN MSBJDN. (rus.).
24. Sharafutdinov R.F., Razvodovskii D.E., Zakatov D.S. Single bored pile settlement prediction taking into account the elastic-plastic behavior of the soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 3:7-15. EDN OFOAVE. (rus.).
25. Savinov A.V. *Application of piles driven by pressing in the reconstruction of historical urban development : abstract of dis. ... doctor of technical sciences*. Volgograd, 2008; 34. EDN NKJRJL. (rus.).
26. Geddes J.D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading. *Geotechnique*. 1966; 16(3):231-255. DOI: 10.1680/geot.1966.16.3.231
27. Barvashov V.A. Calculation on ETsVM of draft of piles from vertical loading and definition of movements of soil around piles. *Proceedings of the 3rd scientific and technical conference of young researchers of the Research Institute of Foundations*. 1967; 20-23. (rus.).
28. Frank R. *Etude theorique du comportement des pieux sous charge vertical; introduction de la dilatance*. Paris, France, 1974; 238.
29. Cooke R.W. Settlement of friction pile foundations. *Proceeding Conference on Toll Buildings*. 1974; 7-19.
30. Coyle H.M., Reese L.C. Load transfer for axially loaded piles in clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1966; 92(2):1-26.
31. Piskunov N.S. *Differential and integral calculus. Vol. 2*. Moscow, Science, 1985; 576. (rus.).

32. Boussinesq J. *Applications des Potentiels a l'Étude de l'Équilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*. Paris, Gauthier-Villiers, Imprimeur-Libraire, 1885.
33. Scott R.F. *Foundation analysis*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1981; 545.
34. Schleicher F. Zur Theorie des Baugrundes. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1925; 5:199; Bauingenieur, 1926; 48(7):931-935; 49:949-952.
35. Giroud J.P. *Tables pour le calcul des fondations. Vol. 1: Tassement*. Paris, Dunod, 1972; 383.
36. Ilyichev V.A., Anikiev A.V. A system with one and a half degrees of freedom as a dynamic model of a heterogeneous foundation. *Proceedings of the Institute NIIOSP named after N.M. Gersevanov*. 1987; 85:30-32. (rus.).
37. Mindlin R.D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid. *Physics*. 1936; 7(5):195-202. DOI: 10.1063/1.1745385
38. Nishida Y. Vertical stress and vertical deformations of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite. *Proceedings of the 1-st International Society for Rock Mechanics Congress*. 1966; 2:493-498.
39. Nguyen Giang Nam. Determination of the settlement of a round stamp taking into account its depth. *Construction — formation of the living environment : collection of works of the 4th International scientific and practical conference of young scientists, postgraduates and doctoral students*. 2006; 40-43. (rus.).
40. Znamensky V.V. *Work of pile foundation in clay soils and their calculation based on deformations of the base : abstract of dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 1971; 14. (rus.).
41. *PLAXIS 2D-v.9 Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: User Manual*. Rotterdam, Balkema, 2008.
42. Mossakovskiy V.I. The main mixed problem of elasticity theory for a half-space with a circular line of separation of boundary conditions. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1954; 18(2):187-196. (rus.).
43. Efremov M.G., Kononov P.A., Mikheev V.V. On the distribution of layer-by-layer soil deformations in the compressible thickness of clay and sandy foundations (based on field test materials). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1963; 6:5-7. EDN XYWMZF. (rus.).
44. Fedorovskii V.G., Bezvolev S.G. Prediction of shallow-foundation settlements and selection of bed models for slab analysis. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2000; 4:10-18. EDN WESCFN. (rus.).
45. Sharafutdinov R.F., Bezvolev S.G. Determination of shear creep of clay soils by field and laboratory methods during surveys under pile foundations. *Russian Surveyors Forum : collection of reports of the III International Scientific and Practical Conference*. 2022; 271-275. EDN TGREAF. (rus.).

Received January 9, 2025.

Adopted in revised form on March 22, 2025.

Approved for publication on March 22, 2025.

B I O N O T E S : **Andrej G. Alekseev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research; **Research, Design and Survey and Design and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov of the Research Center “Construction”**; 59 Ryazansky prospect, Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 9753-4640, ID RSCI: 873091, ResearcherID: AAB-8070-2020, ORCID: 0000-0001-6020-0328; adr-alekseev@ya.ru;

Stepan G. Bezvolev — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher; **Research, Design and Survey and Design and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov of the Research Center “Construction”**; 59 Ryazansky prospect, Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 271303, Scopus: 6602971111; compgeo@ya.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при компенсационном нагнетании вблизи котлована

Армен Завернович Тер-Мартirosян¹, Валерий Петрович Кивлюк²,
Илья Олегович Исаев²

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

² Мосинжпроект; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство транспортных линий и вспомогательных сооружений метрополитена часто сопряжено с большими сложностями в обеспечении предельных значений осадок и кренов зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния нового строительства. Компенсационное нагнетание является мероприятием, которое позволяет уменьшить скорость нарастания деформаций грунтового основания, а также обеспечить значения осадок и кренов, не превышающие предельных величин. Исследование посвящено постановке и аналитическому решению задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии c от края ограждающей конструкции котлована

Материалы и методы. Для задачи о НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии c от края ограждающей конструкции котлована компоненты напряжений получены на основе решения задачи Э. Мелана. Деформации грунтового массива определены с помощью закона Гука.

Результаты. Разработан аналитический метод количественной оценки НДС основания при действии давления компенсационного нагнетания. Получены изополя напряжений и деформации, которые позволяют установить величины строительного подъема основания и тем самым оценить эффективность метода компенсационного нагнетания.

Выводы. В результате аналитического решения задачи о действии давления нагнетания, направленного вверх и вниз, вблизи ограждающей стены котлована на основании решения Мелана получены формулы для определения компонент нормальных и касательных напряжений. Анализ результатов решения показывает, что действие давления нагнетания, направленного вверх и вниз вблизи ограждающей стены котлована, существенно влияет на НДС всего массива, а в ограждающей конструкции могут возникать значительные горизонтальные напряжения, что требует учета при расчете ограждающих конструкций по I группе предельных состояний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компенсационное нагнетание, давление нагнетания, манжетная технология, НДС, грунтовое основание, задача Мелана, ограждение котлована

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Кивлюк В.П., Исаев И.О. Изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при компенсационном нагнетании вблизи котлована // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 734–744. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.734-744

Автор, ответственный за переписку: Армен Завернович Тер-Мартirosян, gic-mgsu@mail.ru.

A change in the stress-strain state of soil mass due to compensation grouting near an excavation

Armen Z. Ter-Martirosyan¹, Valery P. Kivlyuk², Ilya O. Isaev²

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

² Mosinzhprouekt; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Construction of transportation lines and auxiliary structures of an underground railway is often cumbersome due to the requirement not to exceed maximum values of subsidence and tilt of buildings and structures in areas affected by new construction projects. Compensation grouting is the action that decelerates soil deformations and prevents the subsidence and tilt of buildings and structures from exceeding the limit values. The study focuses on the formulation of and the analytical solution to the problem of the stress-strain state of the soil mass that has weight and that is located beyond the excavation shoring, if depth equals h , distributed strip load q is constant, width b equals $2a$, depth equals d , and the distance from the edge of the pit retaining wall equals c .

Materials and methods. A solution to the E. Melan problem was applied to obtain normal and tangential stresses to solve the problem of the stress-strain state of the soil mass that has weight and that is located beyond the excavation shoring, if excavation depth equals h , distributed strip load q is constant, width b equals $2a$ at depth d , and the distance from the edge of the excavation shoring equals c . Hooke's law was applied to find the soil mass deformation.

Results. An analytical method was developed to make a quantitative assessment of the stress-strain state of soil under the action of compensation grouting. Isofields of stresses and deformations were obtained to find values of soil uplift and to evaluate the compensation grouting effectiveness.

Conclusions. An analytical solution to the E. Melan problem was applied to solve the problem of injection pressure, acting upward and downward near the excavation shoring, and to derive formulas needed to find components of normal and tangential stresses. The solution analysis shows that the injection pressure, acting upward and downward near the excavation shoring, greatly affects the stress-strain state of the entire soil mass, while large horizontal stresses may occur in the excavation shoring. This issue must be considered in the course of analyzing the strength and stability of excavation shoring.

KEYWORDS: compensatory injection, injection pressure, sleeve-type technology, stress-strain statement, soil, E. Melan task, excavation shoring

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Kivlyuk V.P., Isaev I.O. A change in the stress-strain state of soil mass due to compensation grouting near an excavation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5): 734-744. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.734-744 (rus.).

Corresponding author: Armen Z. Ter-Martirosyan, gic-mgsu@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция современных транспортных линий и вспомогательных сооружений метрополитена в уже сложившуюся застройку г. Москвы влечет за собой значительные трудности в обеспечении безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния нового строительства подземных сооружений. Эти здания и сооружения подвергаются дополнительным осадкам и кренам, которые зачастую многократно превышают предельно допустимые значения, установленные СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Компенсационное нагнетание — мероприятие, которое трансформирует напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового основания таким образом, что становится возможным уменьшить скорость нарастания деформаций грунтового основания, а также обеспечить значения осадок и кренов, не превышающих предельных величин.

Одними из самых показательных по технологичности и эффективности примеров применения данной технологии в гидротехническом строительстве являются стабилизация имеющихся осадок, вызванных геологическими процессами в основании гидроузла на судоходной р. Неккар вблизи г. Хессигхайм [1], строительный подъем сооружения Загорской ГАЭС-2 (рис. 1) [2–4]. Также технология компенсационного нагнетания имеет успешную реализацию в примерах метростроения (рис. 2), описанных С. Kummerer, E. Falk, F. Gularte [5], S.K.A. Au, K. Soga, M.R. Jafari, M.D. Bolton и К. Komiya [6] и др. [7–14].

Технология выполнения работ по компенсационному нагнетанию состоит из следующих этапов: бурение скважин и их обустройство; установка манжетного иньектора в манжетную колонну, удаление манжетной колонны и установка двойного пакера в зону нагнетания, фиксация пакера и нагнетание раствора через манжету под давлением от насосной станции. Трубы-иньекторы оснащаются резино-

выми манжетами, выполняющими роль обратного клапана, не позволяющего попадать раствору обратно из скважины в иньектор при снижении давления. Нагнетание ведется точно путем многократной иньекции [4, 15]. Последовательность работ при манжетной технологии нагнетания иньекционного раствора представлена на рис. 3.

Большинство исследований по компенсационному нагнетанию сосредоточены на определении эффективности строительного подъема массива грунта и фундаментных конструкций, находящихся в нем. А.Н. Симутиным рассмотрена задача о радиальных перемещениях для подъема массива грунта в пределах ячейки [16]. Автор И.В. Чубатов [17] разработал специальную методику численного моделирования геомеханических процессов, возникающих в грунте основания при адресном нагнетании строительного раствора. Известно теоретическое решение для определения НДС грунтового основания при появлении нормального и сдвигового напряжений, вызванных в точке объемного расширения из-за гидроразрыва и в точке заполнения пор раствором. Оно разработа-



Рис. 1. Проведение работ по подъему массива грунта над моделью фундаментной плиты на площадке опытного участка Загорской ГАЭС-2

Fig. 1. Soil mass uplift above the model of the foundation plate at the experimental site of Zagorsk mixed pumped-storage plant-2

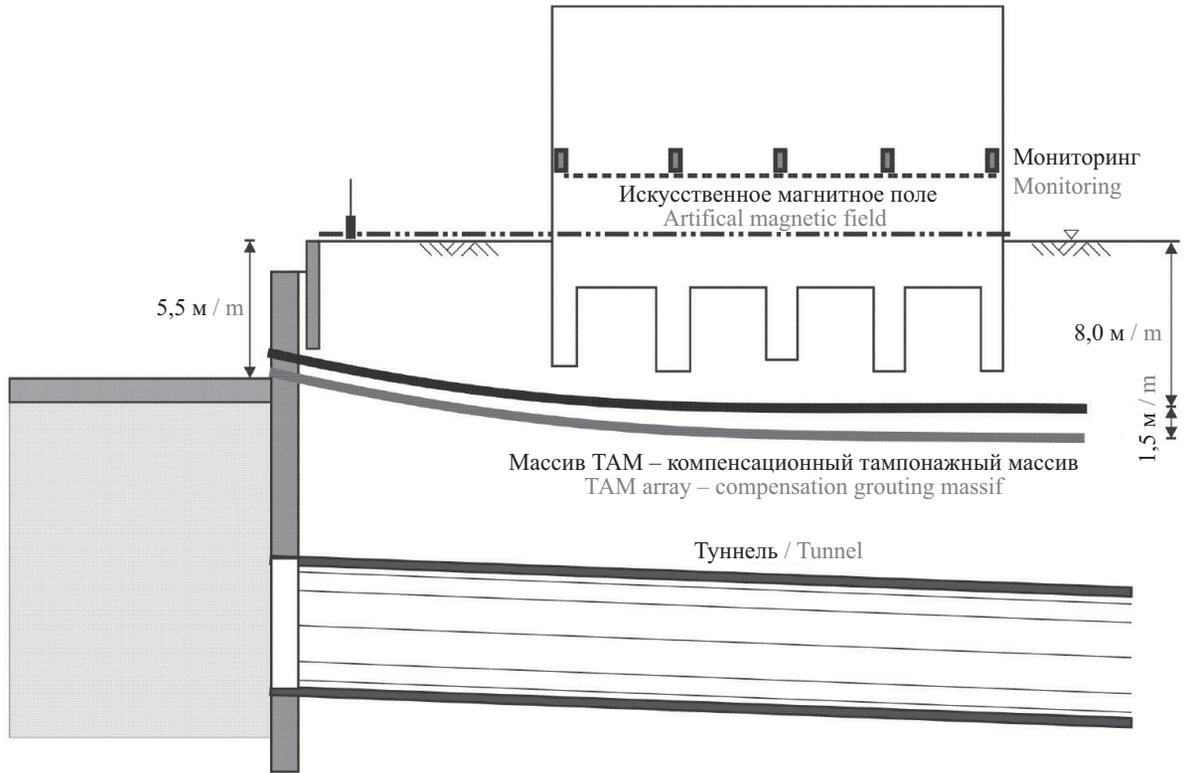


Рис. 2. Пример выполнения компенсационного нагнетания в рамках проходки туннеля (по С. Kummerer, Е. Falk, F. Gularte)

Fig. 2. The case of compensation grouting in the course of tunneling (K. Kammerer, E. Falk, F. Gularte)

но Sagaseta [18], а позже доработано Gollegger [19] на основе метода зеркального отображения, который используется при расчете осадок земной поверхности вследствие перебора грунта при проходке туннелей.

Одним из первых решений по оценке напряженного состояния при действии линейной нагрузки на поверхность полупространства является

решение Фламана (1892 г.) [20, 21]. Также вопросами распределения напряжений в массиве грунта занимались многие ученые: Мелан (1919 г.) [22], Маргер (1931 г.), Бурмистер (1956 г.), О.Я. Шехтер (1937 г.), Г.К. Клейн [23], М.И. Горбунов-Посадов (1946–1953 гг.) [24], К.Е. Егоров (1961 г.) [25], Н.А. Цытович (1943 г.) [26].

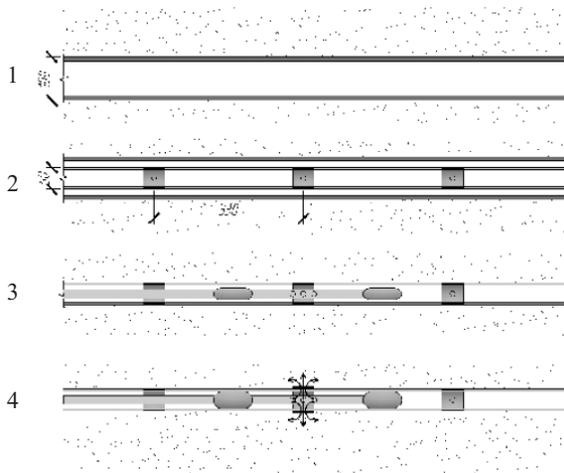


Рис. 3. Последовательность работ при манжетной технологии нагнетания инъекционного раствора

Fig. 3. The sequence of operations performed within the framework of the sleeve-type injection technology

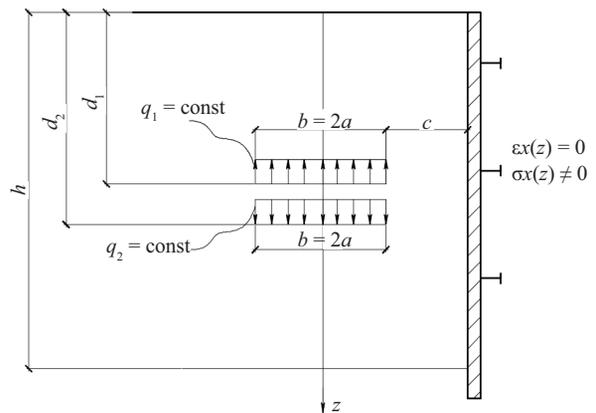


Рис. 4. Расчетная схема для определения НДС при действующих нагрузках $q_1 = \text{const}$ и $q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d_1 и d_2 на расстоянии c

Fig. 4. The design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ for width $b = 2a$, depth d_1 and d_2 , and distance c

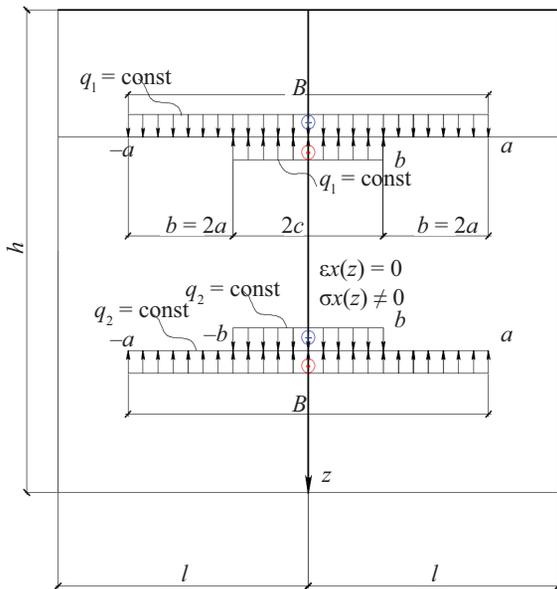


Рис. 5. Эквивалентная расчетная схема для определения НДС при действующей нагрузке $q = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 5. The equivalent design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at a distance c

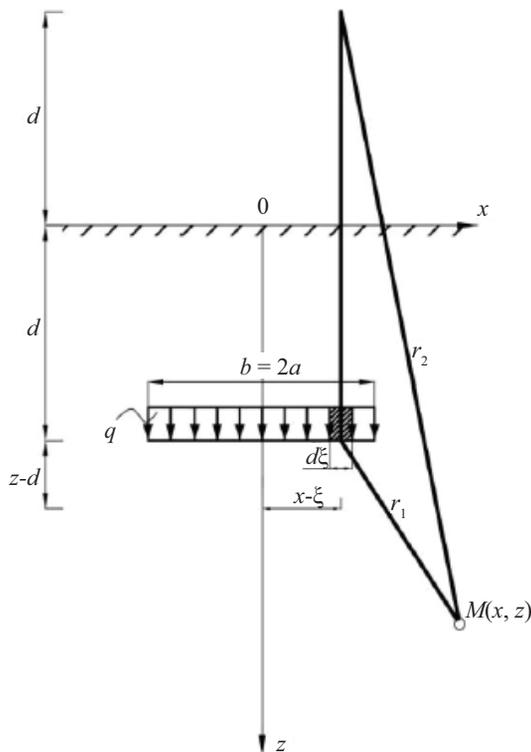


Рис. 6. Расчетная схема по уравнениям Мелана для определения НДС при нагрузке $q = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d

Fig. 6. The design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d (the E. Melan problem)

Несмотря на развитие новых методов и подходов к определению НДС грунтовых массивов при проведении работ по компенсационному нагнетанию, в настоящее время отсутствуют аналитические решения, позволяющие при этом учесть большой спектр факторов.

Цель исследования — получить аналитическое решение действия давления нагнетания в массиве грунта при выполнении работ по манжетной технологии, позволяющее учесть расстояние от котлована до зоны нагнетания, ширину зоны и величину подаваемого давления.

В статье приведены постановка и аналитическое решение задачи об НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h при действии компенсационного нагнетания в виде распределенной полосовой нагрузки $q_1 - q_2 = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d_1 и d_2 на расстоянии c от края ограждения котлована.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема к задаче приведена на рис. 4. Для создания равномерно распределенной нагрузки на расстоянии c от ограждения котлована использовался принцип симметрично расположенных нагрузок [27–30]. Расчетная схема представлена в виде сложения равномерно распределенных нагрузок интенсивностью q_1 по полосе шириной $2a$ и интенсивностью $-q_1$ по полосе шириной $2c$ с аналогичным действием нагрузок q_2 по полосе шириной $2a$ и интенсивностью $-q_2$ по полосе шириной $2c$. Эквивалентная расчетная схема для моделирования действия давления нагнетания цементного раствора по манжетной технологии в грунтовой массив показана на рис. 5.

Для определения компонент напряжений в однородном по глубине массиве грунта в условиях плоской задачи, когда действует распределенная нагрузка по полосе шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии c , необходимо использовать уравнения, полученные Э. Меланом для сосредоточенной силы на глубине. Данные уравнения требуется проинтегрировать в пределах ширины полосы нагрузки от $-a$ до a ($b = 2a$) в соответствии с расчетной схемой (рис. 6). При интегрировании заменить x на $(x - \xi)$, где ξ — переменная интегрирования, и заменить q на $q \cdot d\xi$, где q — интенсивность распределенной нагрузки. Таким образом, будет получено аналитическое решение, учитывающее распределенный характер нагрузки на полосу шириной $2a$.

Результаты интегрирования уравнений Э. Мелана представлены ниже:

$$\sigma_z = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^3}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(z+d)^2 + 2dz]}{r_2^4} - \frac{8dz(z+d)(x+\xi)}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi); \quad (1)$$

$$\sigma_x = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)(x-\xi)^2}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(x-\xi)^2 + 2d^2]}{r_2^4} - \frac{2d(x-\xi)^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)(x+\xi)^2}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi); \quad (2)$$

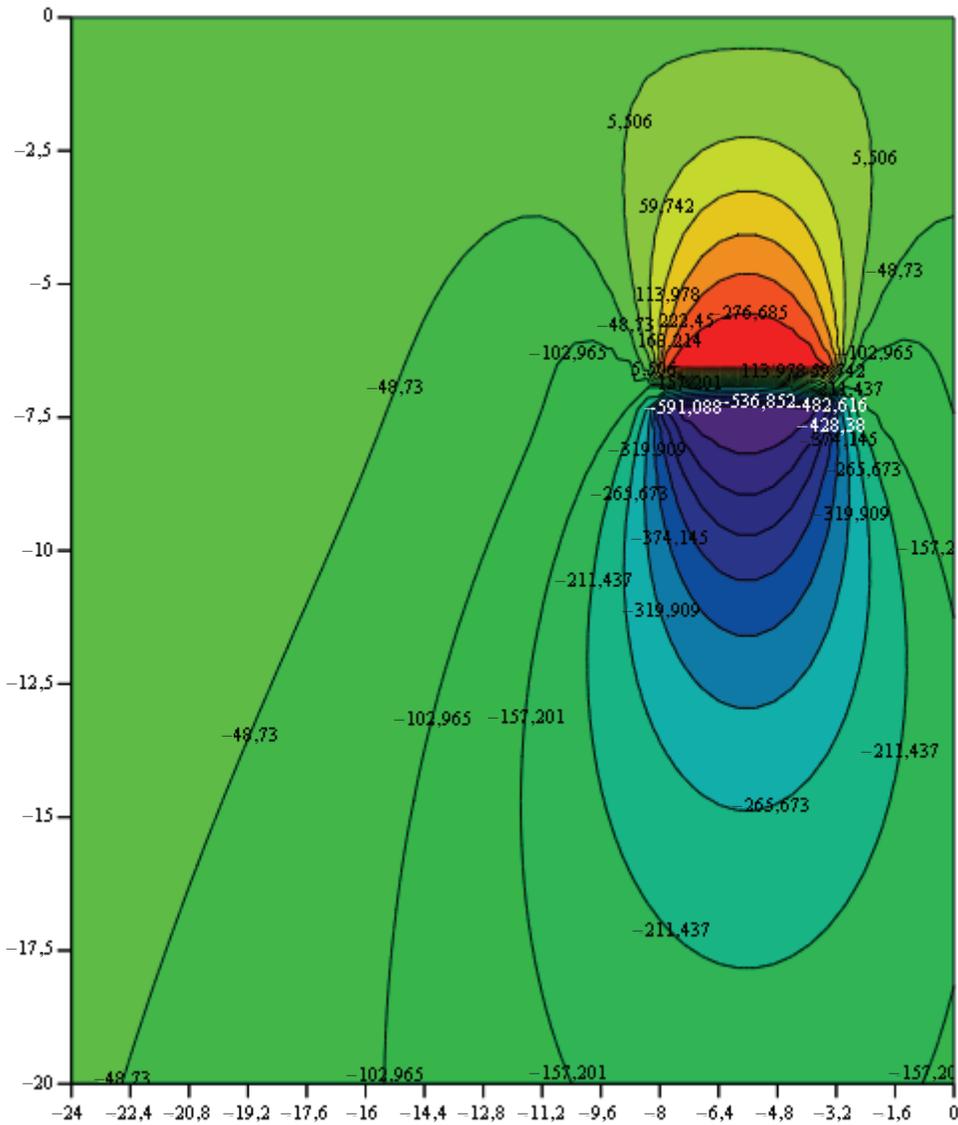


Рис. 7. Изолинии вертикальных напряжений при действии нагрузок $q_1 = \text{const}$ и $q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 7. Isolines of vertical stresses under the action of loads $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at distance c

$$\tau_{zx} = \int_{-a}^a \frac{q(x-\xi)}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^4}{r_1^4} + \frac{z^2 - 2dz - d^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)^2}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{4z(z+d)}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi), \quad (3)$$

где переменные r_1 и r_2 могут быть описаны формулами:

$$r_1^2 = (x-\xi)^2 + (z-d)^2; \quad (4)$$

$$r_2^2 = (x-\xi)^2 + (z+d)^2. \quad (5)$$

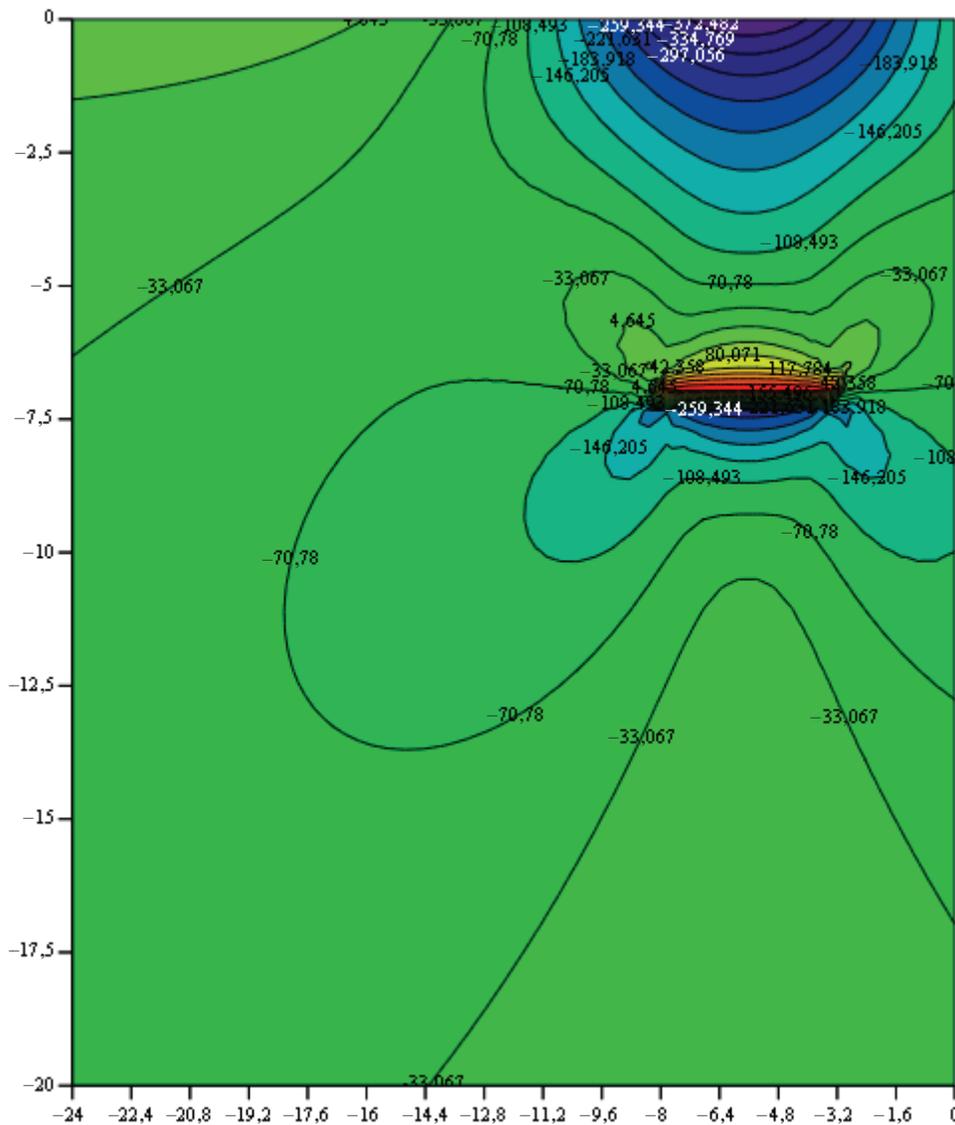


Рис. 8. Изолинии горизонтальных напряжений при действии нагрузок $q_1 = q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 8. Isolines of horizontal stresses under the action of loads $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at distance c

Результаты расчета деформаций основания демонстрируют эффект строительного подъема. Таким образом, данное решение может быть применимо для предварительной оценки необходимых параметров компенсационного нагнетания. Стоит отметить,

что полученное аналитическое решение реализуется в ПК MathCAD без использования метода конечных элементов и при дальнейшей доработке станет альтернативой при текущем уровне развития отечественного программного обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Александров А.В. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 32–40. EDN TYCWVL.
2. Александров А.В., Беллендир Е.Н., Лащенко С.Я., Альжанов Р.Ш. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы // Гидротехническое строительство. 2016. № 7. С. 2–10. EDN WHPWUX.
3. Харченко А.И., Харченко И.Я., Панченко А.И., Газданов Д.В. Технология выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 490–498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498. EDN OSZROL.
4. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 552–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558. EDN YQPQYJ.
5. Kummerer C., Schweiger H.F., Otterbein R. Active Settlement Control with Compensation Grouting — Results from a Case Study // Grouting and Ground Treatment. 2003. Pp. 813–823. DOI: 10.1061/40663(2003)16
6. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting // Tunnel. 2008. No. 3. Pp. 38–45.
7. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 3. Pp. 254–262. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(254)
8. Au W., Masini L. Compensation grouting in sandy soils: the influence of TAM installation // Report on the Research collaboration between Deltares, University of Cambridge and “Sapienza” University of Rome. 2008.
9. Page R.J., Ong J.C.W., Osborne N., Shirlaw N. Jet Grouting for Excavations in Soft Clay- Design and Construction Issues // International Conference on Deep Excavations (ICDE) 2006. 2005.
10. Маковский Л.В., Чеботарев С.В. Ограничение осадок поверхности земли путем компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей закрытым способом // Транспорт, наука, техника, управление. 2000. № 2. С. 44–47.
11. Demenkov P., Trushko O., Potseshkovskaya I. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Issue 23. Pp. 9161–9169.
12. Zuiavska N., Gubashova V., Korobiichuk V. Modeling of the effect of a high-pressure jet of cement mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/202128003001
13. Qi Y., Wei G., Xie Y. Method of Calculating the Vertical Displacement and Additional Stress of Existing Tunnels under the Influence of Grouting Rings of New Tunnels // Symmetry. 2020. Vol. 12. Issue 10. P. 1623. DOI: 10.3390/sym12101623
14. Wang R.L., Chen Y., Ren J. Application of compensation grouting in the existing tunnels' repair // Underground Eng. Tunn. 2013. Pp. 51–57.
15. Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р., Волосюк Д.В., Горская Я.В. Технология ремонтных и восстановительных работ : учебник. М. : Издательство АСВ, 2016. 148 с.
16. Симутин А.Н. Методики расчета параметров компенсационного нагнетания для управления деформациями оснований зданий и сооружений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 165 с. EDN IJMNUЕ.
17. Чубатов И.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основания гидротехнических сооружений при компенсационном нагнетании : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 151 с. EDN JBGBXX.
18. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss // Geotechnique. 1987. Vol. 37. Issue 3. Pp. 301–320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301
19. Gollegger J. Numerical and Analytical Studies of the Effects of Compensation Grouting : Ph.D. Thesis. Graz University of Technology, Graz, Austria, 2001.
20. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1. М. : Госстройиздат, 1961. 543 с.
21. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement // CR Acad. Sci. 1892. Vol. 114. Pp. 1465–1468.
22. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1932. Bd. 12. H. 6.
23. Клейн Г.К. Теория неоднородной линейно-деформируемой среды и ее приложение к расчету балок на сплошном основании : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1948. 244 с.

24. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована // Труды НИИ оснований и фундаментов. 1954. № 24.

25. Егоров К.Е. О деформации основания конечной толщины // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1961. № 1.

26. Цытович Н.А. Механика грунтов. М. : Стройиздат, 1963. 730 с.

27. Тер-Мартirosян З.Г., Пак Чун Сун. Консолидация и ползучесть слоя грунта ограниченной ширины под действием местной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 2. С. 2–6.

28. Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Yu.V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation // Journal of Physics : Conference Series. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004

29. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью. М. : АСВ, 2020. 912 с.

30. Лузин И.Н. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения на однородном и неоднородном переуплотненном грунтовом полупространстве : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 133 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Заверович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, проректор по научной работе; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X, SciProfiles: 1213926; gic-mgsu@mail.ru;

Валерий Петрович Кивлюк — исполнительный директор — руководитель дивизиона строительства метро; **Мосинжпроект**; 125252, г. Москва, Ходынский бульвар, д. 8, 10; ORCID: 0000-0002-0659-3543; valerykivlyuk@yandex.ru;

Илья Олегович Исаев — руководитель отдела оценки влияния и противоаварийных мероприятий; **Мосинжпроект**; 125252, г. Москва, Ходынский бульвар, д. 8, 10; isaevio@mosinzhprouekt.ru.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Кивлюк В.П. — произведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Исаев И.О. — научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zertsalov M.G.E., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Application of compensation grouting technology for protection of buildings and structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 6:32-40. EDN TYCWVL. (rus.).

2. Aleksandrov A.V., Belledir E.N., Lashchenov S.Ya., Alzhanov R.Sh. Elimination of the consequences of the subsidence of the station building of Zagorsk PSPP-2 and restoration work. *Hydrotechnical Construction*. 2016; 7:2-10. EDN WHPWUX. (rus.).

3. Kharchenko I.Ya., Panchenko A.I., Kharchenko A.I., Gazdanov D.V. Technology of alignment of the building of Zagorsk pumped storage station by compensation grouting method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(4):(115):490-498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498. EDN OSZROL. (rus.).

4. Kharchenko I.Ya., Alekseev V.A., Israfilov K.A., Beterbiev A.S.E. Modern Technologies of Cement Grouting. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(5):(104):552-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558. EDN YQPQYJ. (rus.).

5. Kummerer C., Schweiger H.F., Otterbein R. Active Settlement Control with Compensation Grouting — Results from a Case Study. *Grouting and Ground Treatment*. 2003; 813-823. DOI: 10.1061/40663(2003)16

6. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting. *Tunnel*. 2008; 3:38-45.

7. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003; 129(3):254-262. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(254)

8. Au W., Masini L. Compensation grouting in sandy soils: the influence of TAM installation. *Report on the Research collaboration between Deltares, University of Cambridge and "Sapienza" University of Rome*. 2008.
9. Page R.J., Ong J.C.W., Osborne N., Shirlaw N. Jet Grouting for Excavations in Soft Clay- Design and Construction Issues. *International Conference on Deep Excavations (ICDE) 2006*. 2005.
10. Makovskij L.V., Chebotarev S.V. Limiting the precipitation of the earth's surface by compensatory injection during the construction of tunnels in a closed manner. *Transport, science, technology, management*. 2000; 2:44-47. (rus.).
11. Demenkov P., Trushko O., Potseshkovskaya I. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(23):9161-9169.
12. Zuievskaya N., Gubashova V., Korobiichuk V. Modeling of the effect of a high-pressure jet of cement mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology. *E3S Web of Conferences*. 2021; 280:03001. DOI: 10.1051/e3s-conf/202128003001
13. Qi Y., Wei G., Xie Y. Method of Calculating the Vertical Displacement and Additional Stress of Existing Tunnels under the Influence of Grouting Rings of New Tunnels. *Symmetry*. 2020; 12(10):1623. DOI: 10.3390/sym12101623
14. Wang R.L., Chen Y., Ren J. Application of compensation grouting in the existing tunnels' repair. *Underground Eng. Tunn*. 2013; 51-57.
15. Pronozin Ya.A., Epifantseva L.R., Volosyuk D.V., Gorskaya Ya.V. *Technology of repair and restoration works*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 148. (rus.).
16. Simutin A.N. *Methods of calculating the parameters of compensatory injection for controlling deformations of the foundations of buildings and structures : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2015; 165. EDN IJMNU. (rus.).
17. Chubатов I.V. *Numerical modeling of the stress-strain state of the foundation of hydraulic structures under compensatory injection : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2022; 151. EDN JBGBXX. (rus.).
18. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*. 1987; 37(3):301-320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301
19. Gollegger J. *Numerical and Analytical Studies of the Effects of Compensation Grouting : Ph.D. Thesis*. Graz University of Technology, Graz, Austria, 2001.
20. Florin V.A. *Fundamentals of soil mechanics. Vol. 1*. Moscow, Gosstroyizdat, 1961; 543. (rus.).
21. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement. *CR Acad. Sci*. 1892; 114:1465-1468.
22. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1932; 12(6).
23. Klein G.K. *Theory of a non-homogeneous linearly deformable medium and its application to the calculation of beams on a solid foundation : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1948; 244. (rus.).
24. Gorbunov-Posadov M.I., Shekhter O.Ya., Kofman V.A. Soil pressure on a hard buried foundation and free deformations of the excavation. *Proceedings of the Research Institute of Foundations and Foundations*. 1954; 24. (rus.).
25. Egorov K.E. On the deformation of the base of finite thickness. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1961; 1. (rus.).
26. Tsytoich N.A. *Soil mechanics*. Moscow, Gosstroyizdat, 1963; 636. (rus.).
27. Ter-Martirosyan Z.G., Pak Chun Sun. Consolidation and creep of a soil layer of limited width under the influence of local load. *Foundations, Foundations and Soil Mechanics*. 1998; 2:2-6. (rus.).
28. Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Yu.V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1928(1):012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004
29. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil mechanics in high-rise construction with a developed underground part*. Moscow, ASV, 2020; 912. (rus.).
30. Luzin I.N. *The stress-strain state of the foundations of deep foundations on a homogeneous and inhomogeneous over-compacted soil half-space : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2017; 133. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on April 12, 2025.

Approved for publication on April 29, 2025.

BIOTNOTES: **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Vice-Rector for Research; **Moscow State University of Civil Engineering (National**

Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X, SciProfiles: 1213926; gic-mgsu@mail.ru;

Valery P. Kivlyuk — Executive Director — Head of the Metro Construction Division; **Mosinzhproekt**; 8, 10 Khodynsky boulevard, Moscow, 125252, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0659-3543; valerykivlyuk@yandex.ru;

Илья О. Исаев — Head of the Impact Assessment and Emergency Response Department; **Mosinzhproekt**; 8, 10 Khodynsky boulevard, Moscow, 125252, Russian Federation; isaevio@mosinzhproekt.ru.

Contribution of the authors:

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific guidance, research concept, development of methodology, scientific text editing.

Valery P. Kivlyuk — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

Ilya O. Isaev — scientific text editing.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721.021.23

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.745-763

Модель прогнозного расчета технико-экономических показателей префаб-модуля

Савелий Павлович Заторский, Константин Августович Шумилов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Префабрикация и модульное строительство как инструменты повышения темпов строительного производства становятся все более востребованными для строительной отрасли в нынешних условиях экономики благодаря эффективности монтажа и способности сокращать сроки реализации проектов. Однако, несмотря на эти преимущества, применение технологий информационного моделирования (ТИМ) для автоматизации процессов проектирования модульных объектов и расчетов технико-экономических показателей (ТЭП) остается на недостаточном уровне, поскольку в этой сфере потенциал ТИМ еще не полностью реализован. Поэтому есть необходимость автоматизации процессов различных этапов жизненного цикла (ЖЦ), в том числе расчета показателей проекта для заводского производства. Сделан вывод о целесообразности разработки прогностической модели, снижающей сроки проектирования и повышающей экономическую обоснованность префаб-производства.

Материалы и методы. Рассматриваются практики автоматизации процессов проектирования на основе ТИМ, в частности, в рамках префабричного производства модульных конструкций. Цель исследования — повышение эффективности решения задач управления ЖЦ модульных объектов посредством применения прогностической модели, использующей статистический расчет ТЭП проекта, для более рационального управления данными информационной модели (ИМ) на различных этапах проектирования. Для достижения поставленной цели проведен системный обзор подходов и инструментов автоматизации процессов моделирования и обработки информации.

Результаты. Разработана модель, проанализированы полученные результаты работы модели, представлены возможности и преимущества применения данной модели в рамках префаб-производства. Сформулированы направления дальнейших исследований в рамках методики проектирования модульных объектов.

Выводы. Предложенная модель данных позволяет систематизировать и с достаточной точностью спрогнозировать ТЭП префаб-модулей на основе ИМ и интегрирования статистических расчетов, что дает возможность улучшить процесс принятия решений на ранних стадиях проектирования, а также способствует снижению риска ошибок и сокращению затрат на перепроектирование.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, ранний этап жизненного цикла объекта, модульные конструкции, префаб-производство, расчетная модель, обработка информации, автоматизация проектирования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Заторский С.П., Шумилов К.А. Модель прогнозного расчета технико-экономических показателей префаб-модуля // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 745–763. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.745-763

Автор, ответственный за переписку: Савелий Павлович Заторский, saveliy_zatorskiy@mail.ru.

Model of predictive calculation of technical and economic indicators of the prefabricated module

Saveliy P. Zatorskiy, Konstantin A. Shumilov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Prefabrication and modular construction, as tools for increasing the pace of construction production, are becoming more and more in demand for the construction industry in the current economic environment due to the efficiency of installation and the ability to shorten project deadlines. However, despite these advantages, the use of information modeling technologies for automating the design processes of modular facilities and calculating technical and economic indicators remains at an insufficient level, since the potential of TIM in this area has not yet been fully realized. Therefore, it is advisable and necessary to automate the processes of various stages of the life cycle, including the calculation of project indicators for factory production. It was concluded that it is advisable to develop a predictive model that reduces the design time and increases the economic feasibility of prefabrication.

Materials and methods. The practice of automation of design processes based on BIM, in particular in the framework of factory-based production of modular structures is considered. The purpose of this study is to increase the efficiency of solving the life cycle management tasks of modular objects through the use of a predictive model using the statistical calculation of the TEI project for more rational data management at various design stages. To achieve this goal, a systematic review of approaches and tools for automating modelling and information processing processes was conducted.

Results. As a result of the analysis, a model was developed, the results obtained were analyzed, and the possibilities and advantages of applying this model within the framework of prefabrication were presented. Ways of further research within the framework of modular object design methodology were formulated.

Conclusions. The proposed data model can systematize and predict the TEI of prefabricated modules with sufficient accuracy based on IM and integration of statistical calculations, which improves decision making in the early stages of design, and helps to reduce the risk of errors and reduce the cost of redesign.

KEYWORDS: Information modelling, early stage of object life cycle, modular structures, prefabrication, design model, information processing, design automation

FOR CITATION: Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Model of predictive calculation of technical and economic indicators of the prefabricated module. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):745-763. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.745-763 (rus.).

Corresponding author: Savely P. Zatorskiy, savelyi_zatorskiy@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития экономики большое внимание уделяется применению новых технологий, которые смогут повысить качество проектирования и строительства, окупаемость проектов и максимально сократить сроки производства работ. Использование модульных объектов помогает достигнуть данных целей, поскольку в России накоплен достаточный опыт и есть значительные достижения в развитии объемно-блочного домостроения.

Модульное строительство — это технология, которая становится популярной в мире на сегодняшний день. Она предполагает возведение объекта капитального строительства (ОКС) из заранее подготовленных модулей, произведенных на заводе и привезенных на строительную площадку. Этот подход имеет ряд преимуществ перед традиционными методами строительства [1].

Капитальные модульные конструкции или блоки (Permanent Modular Constructions) изготавливаются вне строительной площадки на заводе или фабрике по технологии сборных конструкций из тех же материалов, в соответствии с теми же нормами и стандартами, что и традиционные строительные проекты [2]. Модули могут быть интегрированы в строительные проекты (встраиваемые модули) на месте или использоваться отдельно в качестве комплексного решения. Они изготавливаются с инженерными системами и внутренней отделкой в более короткие сроки, с меньшим количеством отходов и лучшим контролем качества, так как производятся в специализированных заводских цехах, а не на строительной площадке.

Кроме жилищного строительства модульные конструкции используются в таких отраслях, как энергетика, нефтяная и газовая промышленность. Также широкое применение в России имеют мобильные объекты с применением блок-контейнеров (модулей), обладающие сравнительно несложной и быстрой сборкой с помощью стандартных инструментов. С их внедрением реализуются

проекты бытовых городков, вахтовых поселков, временных складов, КПП и др. [3].

Существует несколько основных причин перехода к модульному строительству, а именно:

- снижение затрат на этапе строительства;
- уменьшение времени строительного цикла;
- улучшение качества.

Несмотря на эти преимущества, технология создает дополнительные ограничения, которые разработчики проектов должны учитывать, такие как:

- специализация производственной линии;
- ограничения по размеру транспортных дорог между заводом и строительной площадкой;
- ограничение размеров модуля в зависимости от габаритов грузового транспорта;
- детали соединений в процессе установки.

Быстро растущая потребность проектов модульного строительства и специализация этого направления требуют разработки высоко детализированного набора рабочих чертежей, чтобы избежать потенциальных задержек, которые могут свести на нет преимущества в эффективности этого подхода. В современных условиях эти потребности реализуются технологией информационного моделирования (ВМ/ТИМ). В статье [4] исследуются проблемы, которые могут быть нивелированы применением технологии в строительных проектах, в том числе перерасход материалов, управление рисками и данными.

Авторы работ [5–7] рассматривают вопрос применения ТИМ для модульного строительства. Они акцентируют внимание на эффективности, отмечая, что эта технология значительно уменьшает затраты, ускоряет сроки реализации проектов и повышает точность как в проектировании, так и других этапах жизненного цикла (ЖЦ) зданий и сооружений. Однако исследования в основном сосредоточены на использовании информационного моделирования для управления процессами строительства и эксплуатации модульных объектов, оставляя в стороне аспекты, связанные с проектированием, расчетами,

обработкой информации в рамках префаб-производства самих модулей.

В то же время ТИМ предоставляет обширную проектную информацию, анализируя которую можно построить прогностические модели производства модулей. Это может не только снизить затраты на строительство в процессе закупки, уменьшая время, которое проектировщики и технологи должны тратить на избыточные действия, но и улучшить качество создаваемых рабочих чертежей за счет устранения проектных предположений (интерпретируемости) [8] и расчетных ошибок, допущенных специалистами. Это позволит детальнее рассмотреть предынвестиционный, проектный и производственный этапы как одно направление, что даст возможность оптимизировать разработку по времени и своевременно вносить изменения в проект.

Такой подход особенно актуален для производства модулей, где требования к точности и согласованности процессов имеют ключевое значение. Таким образом, применение ТИМ и расчетная прогностическая модель в контексте префаб-производства остаются малоисследованным направлением, хотя оно способно усилить эффекты, описанные в исследуемых источниках, обеспечивая дополнительное сокращение затрат и времени, а также повышение качества готовых модулей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучены материалы по автоматизации процессов разработки проектов в среде моделирования с помощью различных инструментов и подходов, выделены основные направления, которые можно адаптировать под проектирование модульных объектов, а именно:

1. Разработка спецификаций.

Авторы публикации [9] предлагают формировать новые спецификации методом копирования стандартных шаблонов с заданием параметров с помощью нодов и программирования на Python в Dynamo Revit. В файл MS Excel с настройкой условий фильтрации экспортируются созданные спецификации. Также в моделях могут встречаться немоделируемые элементы, которые присутствуют в спецификациях [10]. Эту информацию необходимо экспортировать в среду обработки Excel: из элементов составляется список, сортируется по параметрам; формируется таблица; листу дается наименование, и документ сохраняется в выбранную директорию.

В исследовании [11] предлагается разработка спецификаций в Dynamo с распределением элементов каждой комнаты, если здание имеет множество помещений. Предлагаемый порядок решения: определение нужных элементов модели, геометрической и негеометрической информации, создание соответствующих параметров для захвата и документирования. Далее создается окончательный результат

в указанном формате — нодом Elements from Room записывается информация о местоположении; нод Elements from Linked File in Room связывает модель с порядковым номером в базе данных Revit. Элементы в модели классифицируются, эта информация используется для идентификации элементов внутри комнаты, далее идет экспорт ее в MS Excel.

Аналогично были рассмотрены способы автоматизации расчета объемов отделки. Авторы источника [12] вывели 4 основных способа в рамках ТИМ:

- ручной способ;
- связка среды Dynamo и MS Excel;
- расчет с помощью стандартных пакетов нодов и ранее созданных параметров;
- расчет с применением программирования на языке Python в DesignScript.

Продолжают и дополняют это направление авторы статей [13–15]. Они предлагают решения по автоматизации расчета площади полов и стен посредством фильтрации и обработки информации нодами. Например, модуль АСЭП осуществляет извлечение и сортировку информации из информационной модели (ИМ), она обрабатывается и возвращается в модель в виде новых атрибутов к элементам и семействам, эти атрибуты и становятся информацией для будущей экспликации. Нахождение площади поверхности стен непосредственно из модели получается с использованием нода Room.Boundaries. Проверяются параметры помещения, соответствия длины между внутренним, центральным и внешним периметром стены, далее нодами Element.GetLocation, FamilyInstance.FacingOrientation и Room.IsInside.Room проверяются дверные и оконные элементы и проемы, принадлежащие комнате, список фильтруется. Параметры площади получают из пересекающихся дверей и окон, и значение вычитается из общей площади поверхности стен в комнате.

В исследовании [15] разработан скрипт, считающий все проемы помещений и заполняющий параметр «Площадь проемов» автоматически. Решение разработано посредством скриптов на DesignScript и стандартных пакетов нодов.

Расчет суммарной площади облицовываемых стен и ее запись в файл Excel путем нодов разработали авторы источника [16]. Блоками Categories и All Elements of Category отбираются стены; узлами формируются списки с «Маркой» и «Площадью», создается список, применяющийся как фильтр, выводящий массив площадей облицовываемых стен, осуществляется вычисление необходимой суммы; площадь записывается в требуемое место указанного файла нужной директории.

Также исследуется вывод информации о конструктивных элементах из проекта в спецификацию с автоматическим экспортом в другую программу [17]. Посредством импорта библиотек

Autodesk.DesignScript.Geometry и Autodesk.Revit.DB и с помощью функции UnwrapElement(IN[0]). LookupParametr выбираются значения параметров уровня, на котором находятся элементы (если было обнаружено значение параметра «Уровень», то выводится само значение данного параметра, если значение не отображено у данных элементов, проверяется, есть ли значения других параметров как «Зависимость снизу», если есть, то вывод значения).

2. Автоматизация процесса разработки проектной и рабочей документации.

Решение данной задачи авторы статьи [18] предлагают через доработку семейств, в то время как в исследовании [19] поставленный вопрос решается через разработку скрипта, состоящего из нодов, и доработки семейств оборудования, что ускоряет проектирование раздела ВК в Revit.

3. Автоматизированное задание параметров по отношению к различным элементам проекта.

Предложенная [20] структура алгоритма через создание блока Retry с правилами фильтрации рабочих и фактических значений параметров элементов, задание пути к семействам и создание общих параметров со строковым типом входных данных обеспечивают просмотр элементов модели с быстрой проверкой/редактированием отдельных параметров.

Три способа разработки дополнительной функции автоматизированного создания нового параметра элемента ТИМ-модели рассматриваются в работе [21]:

- стандартные инструменты Revit — использовались операции объединения значений нескольких параметров, добавления префиксов и суффиксов, логические операции выбора по условиям; создается два разных алгоритма для прямоугольного и круглого воздуховодов; формирование двух различных спецификаций; не удалось включить расчетную часть в значение нового параметра;

- макросы в Revit. Создан макрос уровня документа с использованием встроенного редактора кода в SharpDevelop C# — метод полностью решает проблему;

- визуальное программирование в Dynamo. Проблему не удалось решить только с помощью визуального программирования и без создания новых узлов. Семейство «воздуховод» является системным, опция «фамилия» — встроенная, стандартного узла для чтения встроенных параметров нет, поэтому необходимо написать новый пользовательский узел на Python. Этот метод полностью решил проблему.

4. Обработка информации.

Упрощение структурирования, полученного в ходе эксперимента массива данных посредством создания скрипта на языке Python Script и использования MS Excel, предлагают авторы статьи [22]. При помощи нодов Dynamator вводится переменная N, являющаяся порядковым номером; создается главное (материнское) семейство, где с помощью

формулы Size_Look_up переменная связывается с таблицей поиска и номером замера. Создаются вложенные семейства, они связываются с одноименными параметрами в главном семействе; добавляются формулы типа $\text{if}(\text{twp.y.} > \text{tser}, Q1, \text{if}(\text{twp.y.} < \text{tser}, Q1 * -1, Q1))$; далее значения получаются из массива, и они дублируются в виде текстовых параметров.

Метод централизации и автоматизации обработки информации на примере работы с классификатором применяют в труде [23], где группа нодов фильтрует в модели все категории моделируемых элементов, которые относятся к воздуховодам и изоляции. Вторая группа нодов получает из файла Excel единицы измерения, которые относятся к нужным категориям семейств. Третья группа нодов присваивает каждому семейству значения и единицы измерения из Excel таблицы. Четвертая группа присваивает всем элементам новый код RBS, соотносящий каждый элемент в системе. Пятая группа нодов получает названия элементов и сопоставляет их со всеми семействами модели, после этого происходит фильтрация списка. Шестая группа нодов присваивает ячейкам «t_Единица измерения» единицы измерения из подгружаемого файла Excel. Далее все пустые позиции во всех спецификациях классификатора заполняются данными, и скриптом для экспорта из модели выгружаются все ведомости с именем «Классификатор» в указанную директорию.

Так как технология префаб подразумевает производство модулей максимальной готовности (с инженерией, сантехникой и отделкой [24]) для работы прогнозной модели предполагается использование универсальной ТИМ-модели [25], где проектировщик в общей модели разрабатывает все инженерные системы и с помощью вспомогательных инструментов (скриптов) их рассчитывает для будущей калькуляции непосредственно в среде моделирования.

Подобный подход описывается в статье [26]. Назначения составного классификатора элементам при разделении строительного объекта на рабочие зоны посредством нодов, Dynamo Script и Excel. Порядок решения в этом исследовании следующий:

- элементам ИМ, несущей конструкции здания, присваивается базовое значение классификатора (код сборки);

- с помощью скрипта Dynamo данные элементов автоматически извлекаются с фильтрацией по уровню в таблицу Excel с подготовленным форматом;

- в файле Excel фильтруется код работы из подключенной базы данных тарифов федеральных единиц;

- исходя из свойств полученных элементов, пользователь выбирает конкретный код, получая эталон времени и цену;

- рассчитываются сроки и стоимость работ, пользователь назначает количество рабочих, машин и рабочих часов;

- второй код автоматизирует присвоение атрибутов элементам модели (каждый элемент получает классификатор работы, сгенерированный автоматически);

- третий код делит конструктивный элемент по рабочим зонам (от пользователя требуется только указание границ рабочих зон линиями);

- детали в границах одной рабочей зоны присваивается ее номер, для каждой детали получается подробный код работы (AK_WorkIntegral);

- формируется график строительства (в средах таблиц MS Project или csv), в расписании каждой соответствующей конкретной работе детали присваиваются сводные классификаторы частей элементов.

При описанной методике количество времени на проектирование сокращается за счет ускорения шагов, которые состоят из монотонных одинаковых операций, следовательно, это сокращает количество ошибок, возникающих из-за человеческого фактора. Однако такие методы требуют больше времени в начале, например, по сравнению с процессами проектирования ТИМ и САПР. Дополнительное время

необходимо на отладку скриптов, кодов и создание элементов модели.

Для разработки модели был исследован вопрос о применении расчетных прогностических моделей для определения объемов материалов. Авторы публикации [27] вывели 24 фактора, влияющих на определение стоимости строительства проектов больниц. На основе 7 объектов-аналогов они спрогнозировали стоимость и вывели средний процент ошибки (AEP) по формуле:

$$AEP = \frac{|AC - PC|}{AC}$$

где AC — реальная стоимость; PC — спрогнозированная стоимость.

В этом исследовании средний процент ошибки по всем составляющим проекта (работам, оборудованию, материалам, монтажу и т.д.) составил 4,51 %, что по заявлению авторов поможет специалистам в строительной отрасли лучше оценивать и управлять затратами на проекты строительства больниц, что снизит риски и улучшит технико-экономические показатели (ТЭП) проекта.

Табл. 1. Спецификация всех смоделированных элементов проекта модуля

Table 1. Specification of all modelled elements of the module project

Артикул Article	Количество Amount	Объем Volume	Длина Length	Площадь Area	Единица измерения Unit of measurement	Категория Category	Наименование Name	Группирование Grouping
Y	Y	1	0	0	м ³ m ³	Y	Y	Y
Y1	Y1	0	1	0	м m	Y1	Y1	Y1
Y2	Y2	0	0	1	м ² m ²	Y2	Y2	Y2
Y3	Y3	0	0	0	шт. pc.	Y3	Y3	Y3

Спецификация (Specification)							
A	B	C	D	E	F	G	H
Артикул	Количество	Длина	Площадь	Ед. изм.	Категория	Наименование	Группирование
1	0,03	0	0	л	Герметик	Герметик, л	P.1
1	0	0	0	л	Герметик	Герметик, л	P.1
2	1	0	0	шт	Мебель	Тумба, шт	P.1
3	2	1,9	0,91	м2	Стены	Фанера хбоя, м2	P.3
4	0	4,05	4,82	м2	Стены	Гипрок, м2	P.3
4	3,96	6,89	3,4	м2	Стены	Гипрок, м2	P.3
4	2,64	4,59	4,23	м2	Стены	Гипрок, м2	P.3
4	1,32	6,89	4,42	м2	Стены	Гипрок, м2	P.3
4	2,64	4,59	4,23	м2	Стены	Гипрок, м2	P.3
5	12	0	0	шт	Крепеж	Саморез 4,2x19, шт	P.3
6	1,54	0	0	м2	Упаковка	Плита ОСП, м2	P.1
7	35	0	0	шт	Основание	Саморез с буром, шт	P.10
7	3	0	0	шт	Основание	Саморез с буром, шт	P.3
8	140	0	0	м	Основание	Проволока вязальная, м	P.1
9	35	0	0	шт	Основание	Саморез с буром, шт	P.10
10	0,4	0	0	м3	Основание	Бетон, м3	P.1
11	6	0	0	шт	Основание	Гайка М8, шт	P.1

Рис. 1. Вид спецификации в ПО Revit

Fig. 1. Specification view in Revit software

Табл. 2. Форматирование таблицы

Table 2. Formatting of the table

Артикул Article	Категория из БД Category from database	Наименование из БД Name from database	Единица измерения из БД Unit of measurement from database	Количество Amount	Индекс Index
Y	X	X	м ³ m ³	Y	Z
Y1	X1	X1	м m	Y1	Z1
Y2	X2	X2	м ² m ²	Y2	Z2
Y3	X2	X2	шт. pc.	Y3	Z3

Также рассматривалась работа [28], где проводилось прогнозирование объемов бетона для проектов цементных заводов, в частности складских сооружений и высотных конструкций. В результате ошибка прогнозирования находилась в пределах от -13 до 17 %.

Данные исследования используются при анализе результатов разрабатываемой модели.

Для наглядности отображения данных в алгоритме работы модели были введены переменные:

X — параметры из базы данных (БД);

Y — параметры из информационной модели;

Z — рассчитанные или присвоенные параметры в файле расчета.

Алгоритм обработки информации в модели:

1. Заполнение данных о проекте (габариты модуля, артикулы расходных материалов, которые не определены в модели, — герметики, затирки, плитка, мепель).

2. Экспорт общей спецификации всех элементов проекта в виде, представленном в табл. 1, и изображении из программы моделирования Revit (рис. 1).

3. Параметр количество уже заполнен для штучных элементов из модели. Но так как есть элементы, измеряемые по параметрам длина, площадь, объем (параметры элементов модели), то с помощью макроса по заранее сформированной выборке элементов по артикулу параметру количество присваивается их значение.

Пример кода присвоения значения длины:

For i = 2 To lastRow ‘ Начиная с 2, так как первая строка заголовок.

If ws.Cells(i, 1).Value = “Y.Y. Y” Or ws.Cells(i, 1).Value = “Y.Y. Y1” Or ws.Cells(i, 1).Value = “Y.Y. Y2” Then ‘. Если есть необходимость, добавить еще материалы: ws.Cells(i, 2).Value = ws.Cells(i, 3).Value ‘ Присваиваем значению количество значение из столбца длина:

End If

Next i.

4. Автоматическое присвоение каждому элементу индекса в зависимости от конечной ведомости, в которой он будет находиться.

Табл. 3. Расчет в таблице с элементами исходя от габаритов модуля

Table 3. Calculation in the table with elements based on module dimensions

Артикул Article	Категория из БД Category from database	Наименование из БД Name from database	Единица измерения из БД Unit of measurement from database	Количество Amount	Индекс Index
Z	X	X	м ³ m ³	F	Z
Z1	X1	X1	м m	F1	Z1
Z2	X2	X2	м ² m ²	F2	Z2
Z3	X2	X2	шт. pc.	F3	Z3
Z4	X2	X2	л l	F4	Z4
Z5	X2	X2	кг kg	F5	Z5

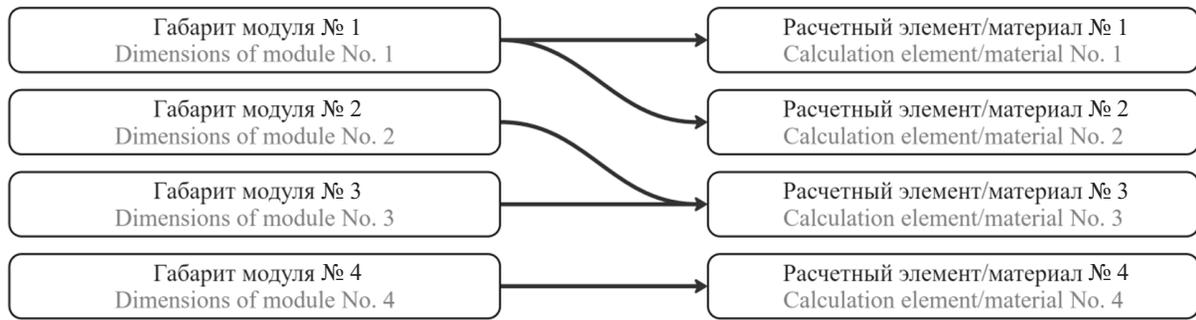


Рис. 2. Зависимости расчетных параметров от габаритов модуля

Fig. 2. Dependences of design parameters on module dimensions

Табл. 4. Расчет немоделируемых элементов

Table 4. Calculation of unmodelled elements

Артикул Article	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Наименование Name	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Количество Amount	1	1	1	1	1	1
Индекс исходных элементов Index of the source element	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Артикул расчетных элементов Article of the design element	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Наименование расчетных элементов из БД Name of the design element from DB	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Единица измерения из БД Unit of measurement from DB	шт. pc.	шт. pc.	шт. pc.	кг kg	кг kg	кг kg
Индекс расчетных элементов Index of design element	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Количество расчетных элементов Amount of design element	F	F1	F2	F3	F4	F5
Кратность округления Rounding factor	0,001	1	0,01	0,01	0,01	0,01

Коэффициент на единицу измерения Coefficient per unit of measurement	1 шт. · 0,15 1 pc · 0.15	19 шт. на 1 м ² округления в большую сторону кратностью 5 Per 1 m ² 19 pcs rounded upwards in multiples of 5	1 шт. / 0,338 с округлением в большую сторону кратностью 1 1 pc / 0.338 rounded upwards in multiples of 5	0,1 кг на 1 м ² 0.1 kg per 1 m ²	0,25 кг на 1 м ² 0.25 kg per 1 m ²	1,2 кг на 1 м ² 1.2 kg per 1 m ²
Пояснение Explanation		Эмпирическая формула Empirical formula	Эмпирическая формула Empirical formula	Расход от производителя Consumption from the manufacturer	Расход от производителя Consumption from the manufacturer	Расход от производителя Consumption from the manufacturer

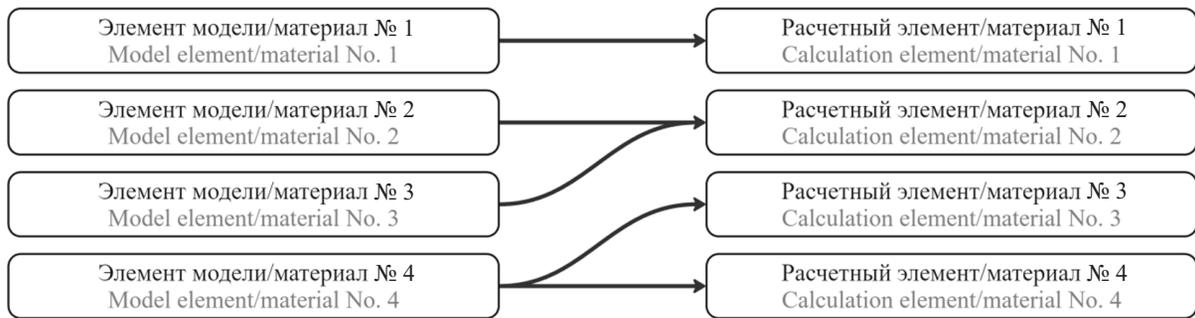


Рис. 3. Зависимости расчетных параметров от смоделированных элементов модели

Fig. 3. Dependencies of design parameters on modelled model elements

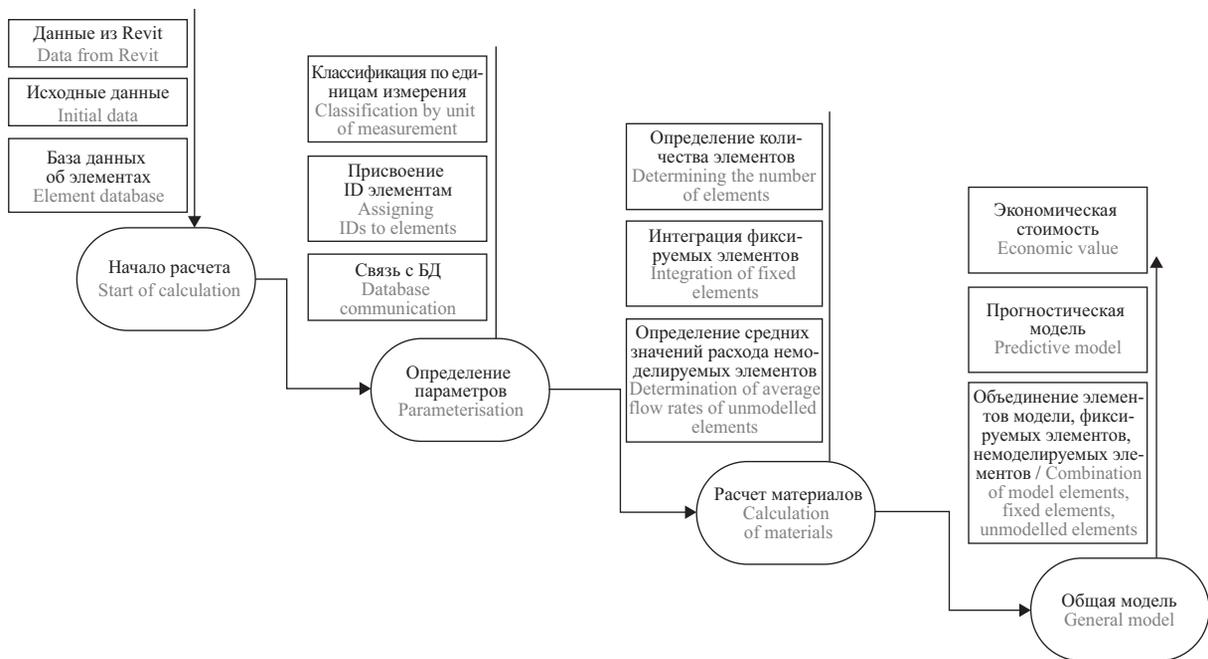


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы прогностической модели

Fig. 4. Block diagram of the predictive model algorithm

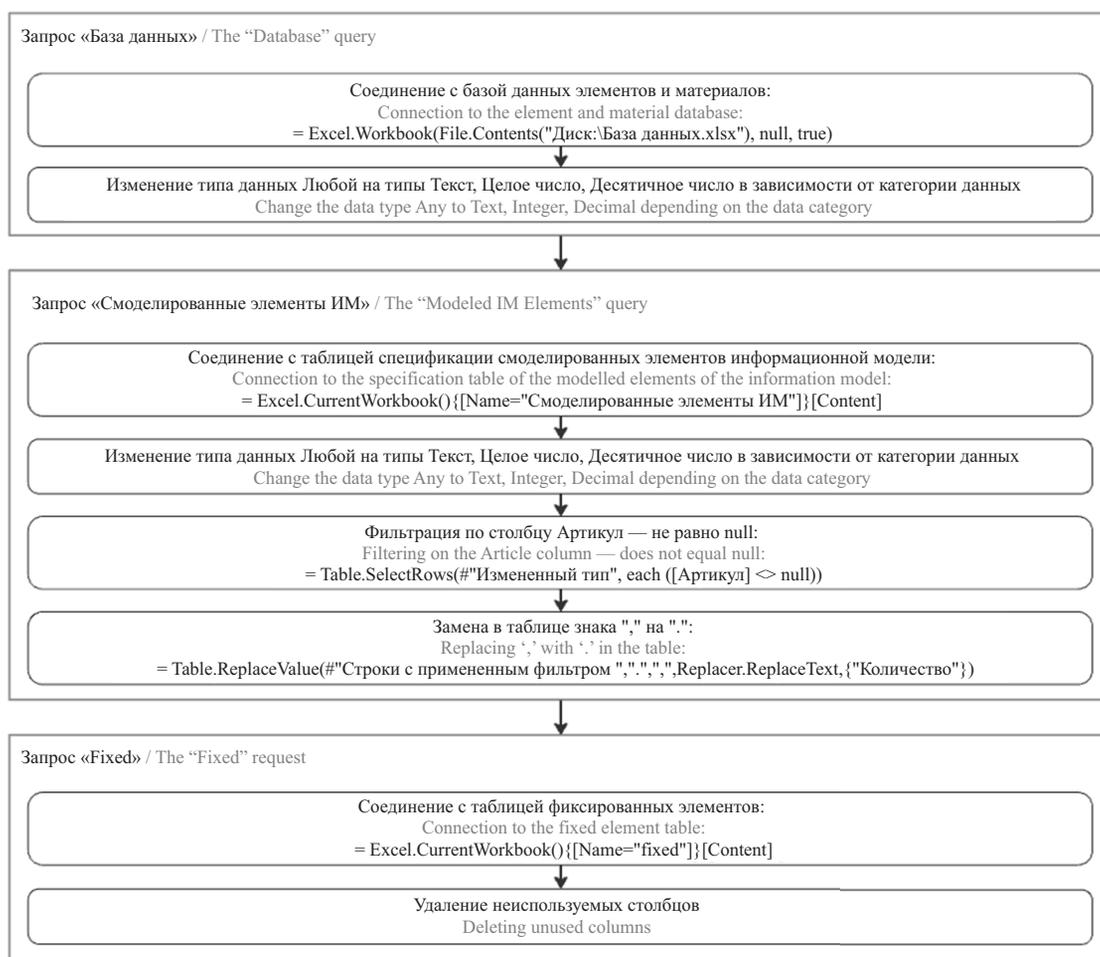


Рис. 5. Структура запросов «База Данных», «Смоделированные элементы ИМ» и «Fixed»

Fig. 5. Structure of “Database”, “Modelled IM elements” and “Fixed” queries

5. Обновление базы данных с информацией о параметрах всех элементов, которые предположительно могут быть использованы для проекта.

6. Интеграция данных из спецификации Revit с БД всех материалов в среде Power Query, а именно связка артикул, количество элементов из спецификации; наименование, категория, единица измерения из базы данных, а индекс рассчитан в файле по группированию. Это необходимо для сверки информации об элементах с базой данных в ситуации, если информация об элементах в спецификации модели Revit устаревает.

7. Форматирование таблицы, остаются параметры: артикул, категория, наименование, единица измерения, количество, индекс. Соответственно таблица имеет вид (табл. 2).

8. Расчет в таблице с элементами, наличие которых фиксировано (fixed) для данного типа модулей и рассчитывается исходя от габаритов модуля (табл. 3).

Параметры F в данном случае — это формулы расчета, разработанные с учетом трех факторов:

1) расход от производителя материала;

2) расход на основе габаритов проектируемого модуля;

3) расход на основе уже построенных модулей и аналогов.

Соответственно для каждого из материалов была разработана формула расчета, исходя из этих трех пунктов.

Схематичное описание шага изображено на рис. 2.

9. Расчет элементов, наличие и количество которых обуславливается наличием и количеством определенных элементов в модели.

Для этого шага была создана таблица расчета немоделируемых элементов на удельную единицу имеющегося в модели элемента. То есть принцип схож с п. 8, но расчет выполняется не по габаритам модуля, а по параметрам смоделированных элементов. Пример в табл. 4.

С помощью Power Query таблица форматируется. Далее запрос данной таблицы объединяется с запросом из п. 7 по артикулам (Z), т.е. алгоритм проверяет условие «Если индекс из таблицы п. 7 равен 0, то в столбце таблицы выводится индекс расчетных

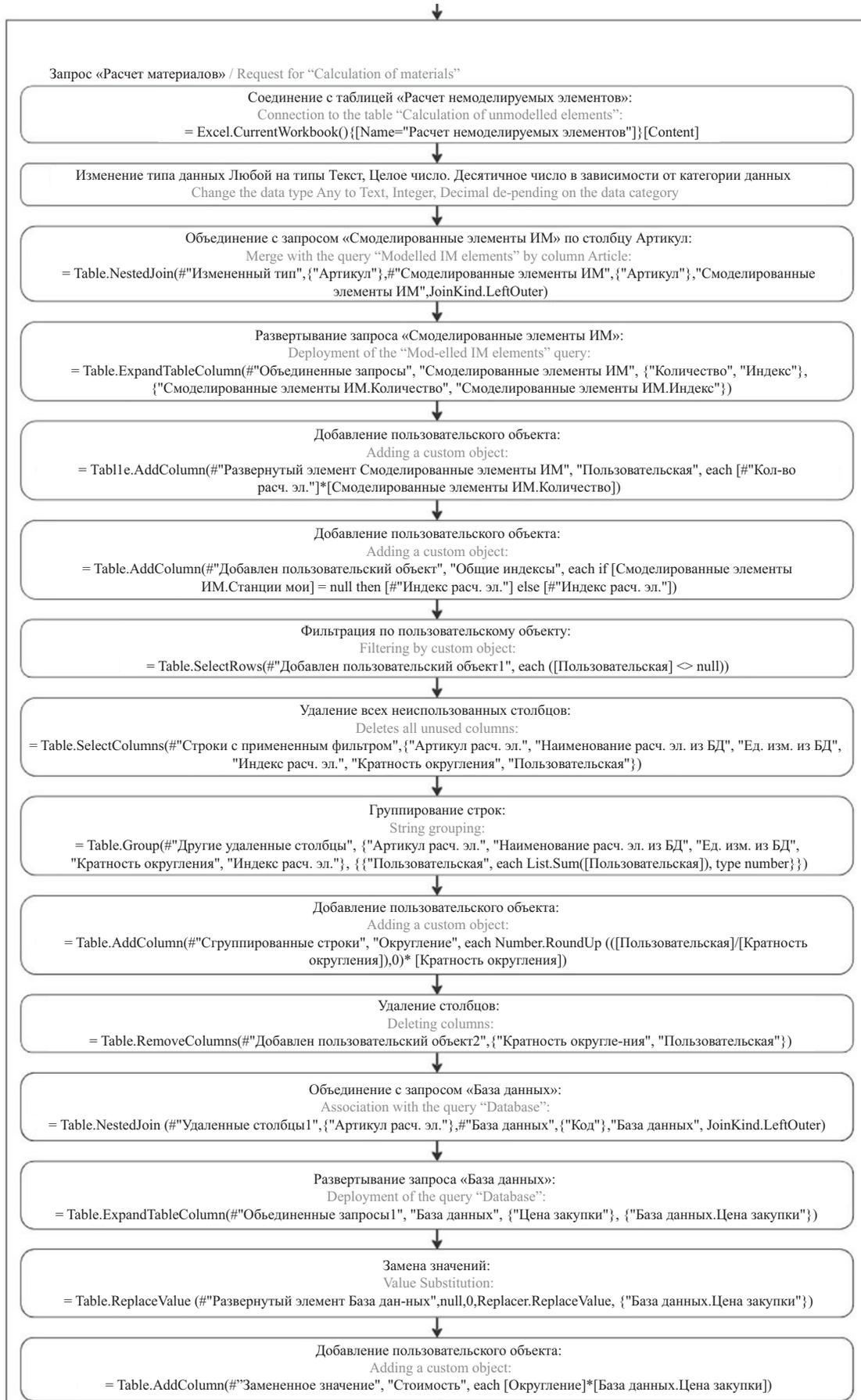


Рис. 6. Структура запроса «Расчет материалов»

Fig. 6. Structure of the “Material Calculation” query

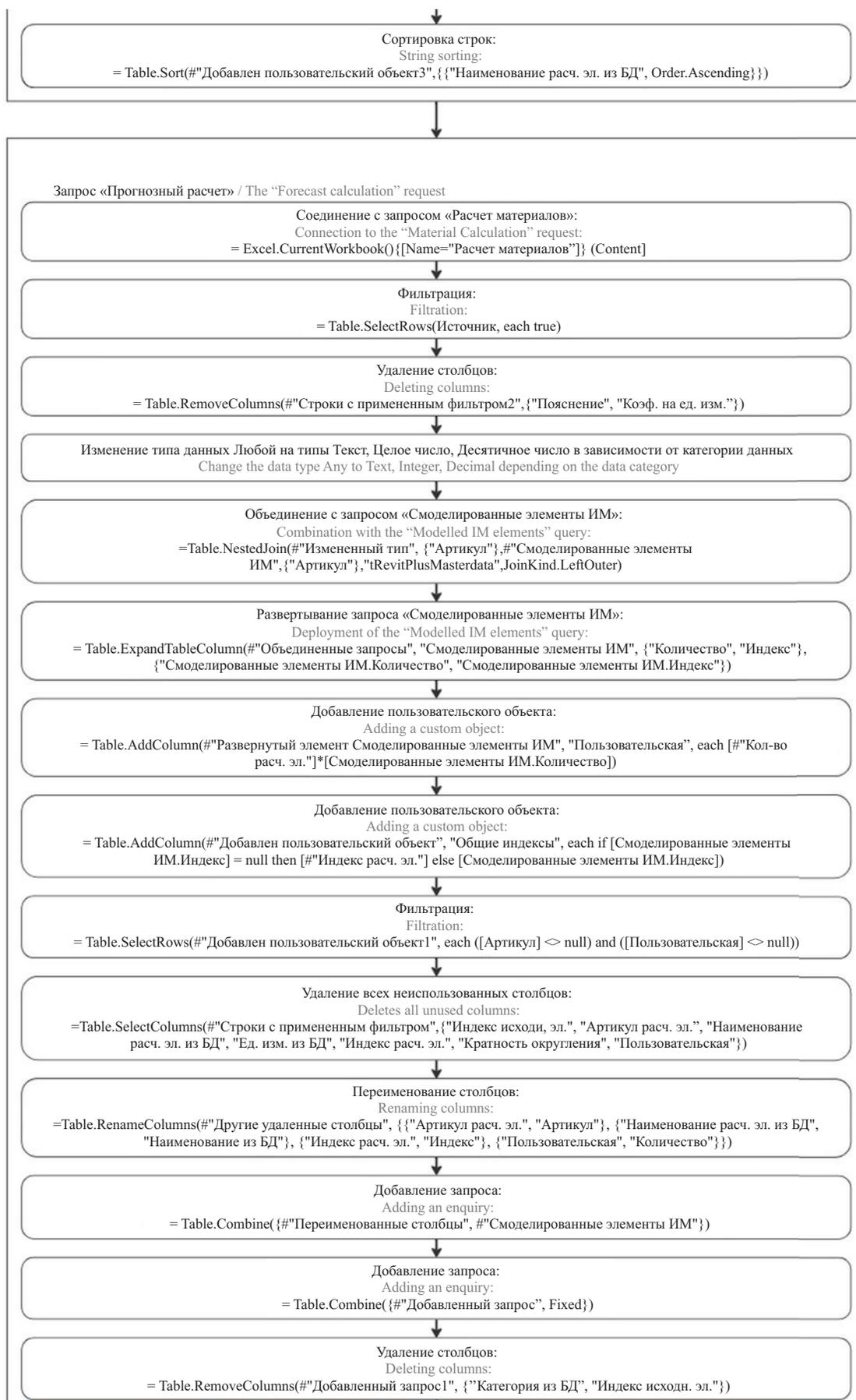


Рис. 7. Структура запросов «Расчет материалов» и «Прогнозный расчет»

Fig. 7. Structure of “Material Calculation” and “Forecast Calculation” queries

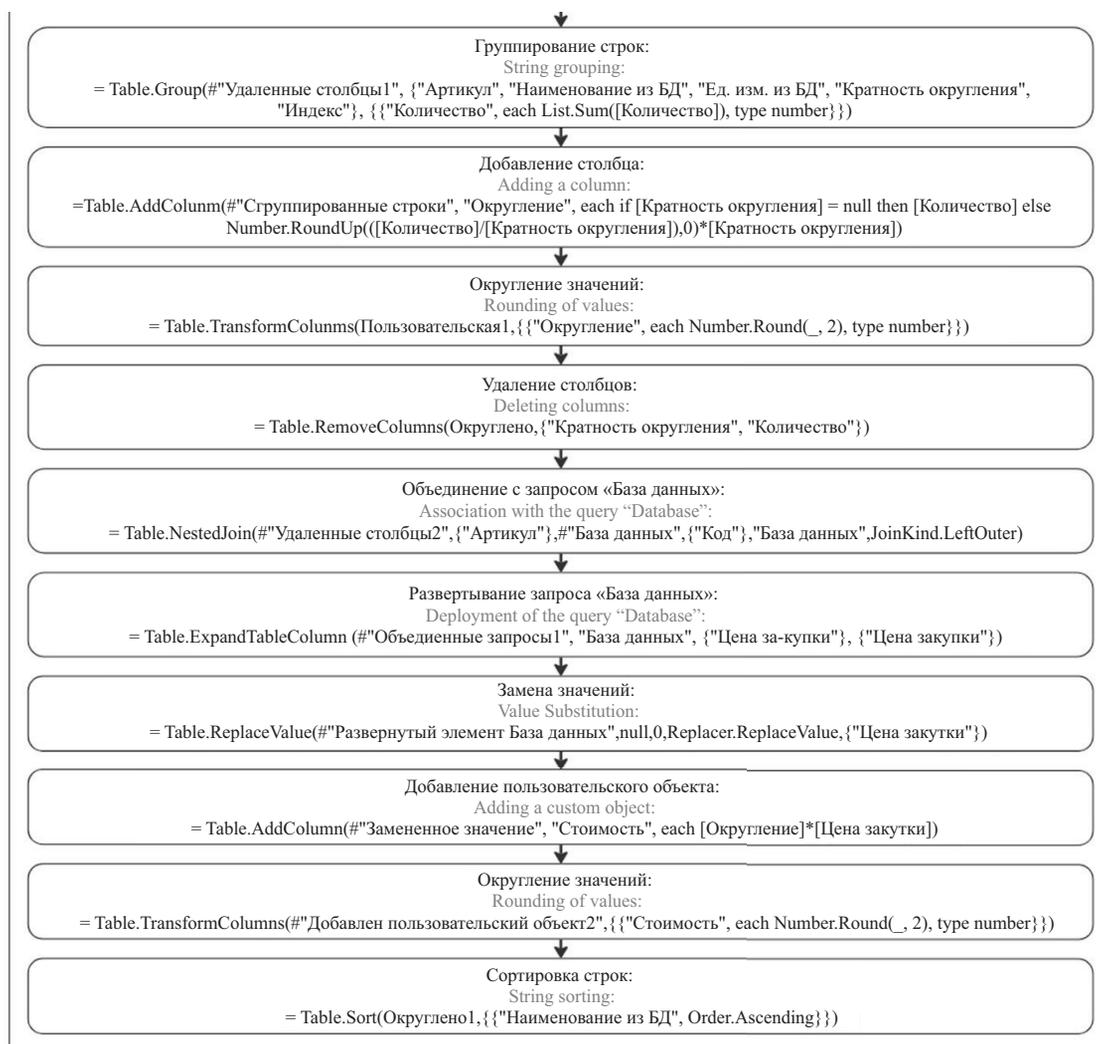


Рис. 8. Структура запроса «Прогнозный расчет»

Fig. 8. Structure of the query "Predictive calculation"

элементов; в противном случае выводится индекс из таблицы п. 7». Далее по совпавшим индексам происходит расчет:

$$[\text{«Кол-во расч. эл.»}](F) * [\text{«Количество»}](Y).$$

Таким образом, по совпавшим с информационной моделью элементам находятся немоделируемые элементы и происходит расчет по формулам F на удельную единицу.

Схематичное описание шага изображено на рис. 3.

10. Объединение трех запросов из пп. 7–9, чтобы получить общую ведомость элементов проекта, по которой будет произведен экономический расчет.

Общий алгоритм работы модели показан на рис. 4.

Подробный пошаговый процесс обработки информации в Power Query отражен на рис. 5–8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апробация работы модели проведена на четырех реализованных проектах-аналогах (рис. 9).

Сравнение производилось в рамках реализации проектов prefab-модулей СТМ (сантехнические модули) [29, 30], так как в них присутствуют сантехнические детали и элементы инженерных систем. В проектах-аналогах расчет всех элементов различных разделов проекта происходил в связке надстройка Dynamo-Revit плюс ручной расчет.

В качестве критериев оценки и сравнения были выбраны количество строк наименований и общая себестоимость всех элементов и материалов (табл. 5).

Полученные результаты работы показывают рост количества наименований расчетных элементов относительно реально смоделированных моделей, что может означать автокорректировку проекта в зависимости от заложенной в расчет технологии. То есть, заложив в расчет определенные формулы и связав элементы ИМ с табличными элементами Excel, можно проанализировать проекты на отсутствие тех или иных заложенных позиций и их количества.

Вычислены проектные ошибки в расчете элементов уже реализованных проектов (среднее количество ошибок на проект — 8), а также ошибки в алгорит-

Табл. 5. Критериальное сравнение результатов работы прогностической модели

Table 5. Criterion comparison of the predictive model results

Первая итерация First iteration	Модуль 1 Module 1	Модуль 2 Module 2	Модуль 3 Module 3	Модуль 4 Module 4
Количество наименований элементов модели в реализованном проекте в зависимости от индекса Number of names of model elements in the realized project depending on the index	166	148	141	163
Время расчета и составления спецификаций и ведомостей Time for calculation and preparation of specifications and statements	2 дня 2 days	1,5 дня 1.5 days	1,5 дня 1.5 days	2 дня 2 days
Количество проектных ошибок в расчете элементов (несовпадение количества наименований и объемов) Number of design errors in the calculation of elements (mismatch in the number of items and volumes)	7	8	7	10
Стоимость всех элементов в реализованном проекте Cost of all elements in the realized project	359 496	355 750	313 387	361 007
Количество наименований элементов в прогностической модели в зависимости от индекса Number of items in the predictive model depending on the index	182	151	164	176
Время расчета и составления ведомостей с использованием модели Calculation and statement generation time using the model	10 мин 10 min	10 мин 10 min	10 мин 10 min	10 мин 10 min
Количество ошибок при работе модели (несовпадение количества наименований и объемов) Number of model errors (mismatches in the number of items and volumes)	22	17	16	12
Стоимость всех элементов в прогнозной модели Cost of all elements in the forecast model	381 021	362 583	336 039	374 814
% различия полученных и спрогнозированных стоимостей материалов проекта % difference between the obtained and predicted costs of project materials	5,99	1,92	7,23	10,89
Средний % различия по стоимости материалов Average % difference in cost of materials	6,51			
% различия количества реальных и спрогнозированных наименований % difference in the number of actual and predicted titles	9,64	4,86	16,31	18,37
Средний % различия по количеству наименований в зависимости от индекса Average % difference in the number of items depending on the index	12,29			

ме работы модели (среднее значение — 16,75 ошибок на расчет). При таких результатах разница в стоимостных показателях с реальными проектами в среднем составляет 6,51 %, а в количестве наименований материалов и элементов 12,29 %. Поэтому был сделан вывод о необходимости устранения проектных ошибок (и учета затраченного на это времени в сравнительных результатах), а также уточнения алгоритмов расчета модели (табл. 6).

Результаты второй итерации работы модели показывают более точный результат. Разница в стоимостных показателях с реальными проектами в среднем составляет 0,87 %. Сравнивая этот показатель с показателями в источниках [27, 28], можно сделать вывод, что прогнозные показатели точны

(точность прогнозирования 99,13 %). Разница в количестве наименований составила 1,59 %, что также свидетельствует о точности прогноза. Из результатов видно, что при относительно большом расхождении в элементах или стоимости проекта в моделях существует вероятность ошибки в проектах, поэтому требуется корректировка и перепроверка уже на стадии полного стандартного моделирования.

Также использование данной модели сокращает срок расчетов материалов и элементов для модуля. При средней продолжительности данного процесса в 2,5 дня расчет и составление ведомостей объемов материалов с помощью модели может составлять 10 мин, что многократно (вплоть до 60 раз) ускоряет процесс.

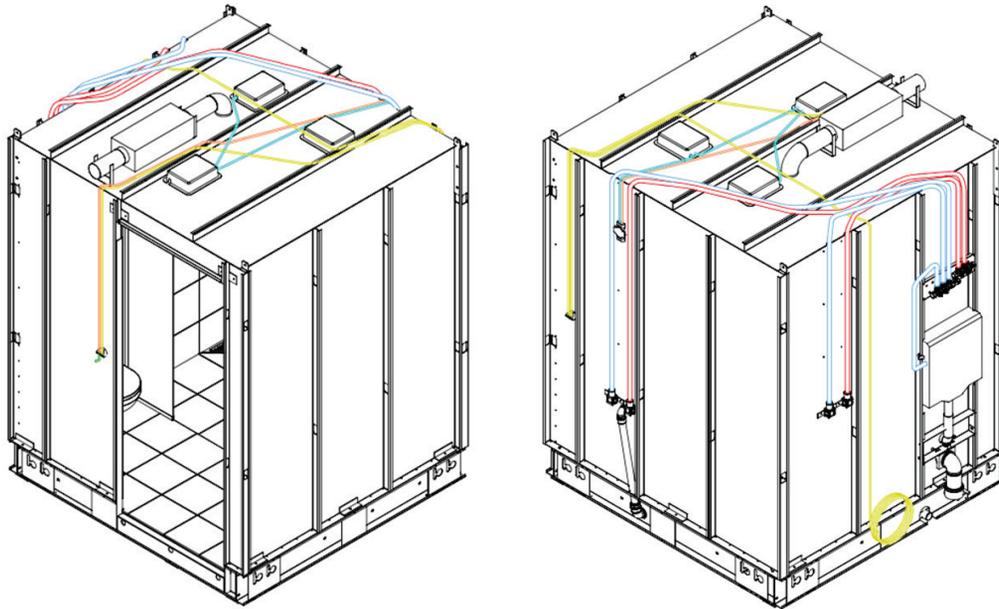


Рис. 9. Пример модулей-аналогов

Fig. 9. Example of analogue modules

Табл. 6. Повторное критериальное сравнение результатов работы прогностической модели

Table 6. Repeated criterion comparison of predictive model results

Вторая итерация Second iteration	Модуль 1 Module 1	Модуль 2 Module 2	Модуль 3 Module 3	Модуль 4 Module 4
Количество наименований элементов модели в реализованном проекте в зависимости от индекса Number of names of model elements in the realized project depending on the index	166	156	151	163
Время расчета и составления спецификаций и ведомостей Time for calculation and preparation of specifications and statements	3 дня 3 days	2 дня 2 days	2,5 дня 2.5 days	2,5 дня 2.5 days
Стоимость всех элементов в реализованном проекте Cost of all elements in the realized project	359 496	380 571	321 808	361 011
Количество наименований элементов в прогностической модели в зависимости от индекса Number of items in the predictive model depending on the index	169	155	157	165
Стоимость всех элементов в прогнозной модели Cost of all elements in the forecast model	359 528	371 054	321 520	357 783
% различия полученных и спрогнозированных стоимостей материалов проекта % difference between the obtained and predicted costs of project materials	0,01	2,50	0,09	-0,89
Средний % различия по стоимости материалов Average % difference in cost of materials	0,87			
% различия количества реальных и спрогнозированных наименований % difference in the number of actual and predicted titles	1,81	0,64	3,97	1,23
Средний % различия по количеству наименований в зависимости от индекса Average % difference in the number of items depending on the index	1,59			

Анализ результатов применения разработанной модели поможет сориентировать как производителя модулей, так и заказчика, если ему требуются стоимостные характеристики объекта.

Результатом данного исследования является алгоритм, который рассчитывает технико-экономические показатели проекта модуля по средним данным с точностью, близкой к реальным расчетам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогностическая модель представляет собой результат работы алгоритма расчета технико-экономических показателей префаб-модуля, как укрупненного блока ОКС. В зависимости от ТЗ на проектирование и концептуальных дизайнерских решений проекта по усредненным значениям рассчитываются все материалы, необходимые для производства определенного модуля, в различных единицах измерения.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть вопрос координации результатов работы модели с моделями управления строительными проектами, как в исследовании [31], где результаты стоимост-

ной, плановой и других оценок проектов были рассмотрены по критериям эффективности командной работы над проектами. Поэтому уместно включить полученные результаты в подобную модель, далее проанализировать вместе с работой команды, процессами проектирования и технологической схемой производства.

Итоги данного исследования имеют практическую и теоретическую ценность в области модульного проектирования для производственной и строительной отрасли. Представленная модель позволяет автоматизировать расчет количественных показателей проекта, снизить сроки расчета, а также на ее основе построить экономическую модель будущего проекта. Таким образом, имеется возможность спрогнозировать и рассчитать технико-экономические показатели на начальном этапе разработки модели, а не на этапе готового проекта, что существенно оптимизирует временные и трудовые затраты на анализ и корректировку проекта. Это, в свою очередь, позволяет улучшить процессы принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Амбарцумян С.А., Мочалин Д.Е., Сьбева Ю.А. Практичность модульного строительства: опыт прошлого и перспективы // Строительное производство. 2024. № 2. С. 61–65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI.
2. Евсевнина Е.Д., Воробьев В.С. Префабрикация: новые технологии и перспективы строительной отрасли // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 3 (75). С. 86–93. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.75.3.008. EDN EQWTFE.
3. Захарова М.В., Пономарев А.Б. Опыт объемно-модульного строительства зданий и сооружений // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 2. С. 190–198. EDN XQHWRP.
4. SVP N., Santhosh A., Gupta A., Arshad M., Ansari A. Framework for the optimization of construction project // African Journal of Biomedical Research. 2024. Vol. 27. Issue 4S. Pp. 4658–4669. DOI: 10.53555/AJBR.v27i4S.4457
5. Зюкина А.Г., Долженкова М.В. BIM-проектирование в модульной архитектуре // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 318–324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043. EDN BIMSGK.
6. Ескалиев М.Ж. Внедрение информационного моделирования в модульном строительстве: преимущества и проблемы // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : сб. мат. V Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2021. С. 286–290. EDN AEYBMX.
7. Бачин И.О. BIM-проектирование модульных жилых домов // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 5. С. 1238–1246. EDN ANGZTE.
8. Alwisy A., Hamdan S.B., Barkokebas B., Bouferguene A., Al-Husseini M. A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings // International Journal of Construction Management. 2018. Vol. 19. Issue 3. Pp. 187–205. DOI: 10.1080/15623599.2017.1411458
9. Абдельхади М.М.Н., Карманова М.М. Автоматизирование функционала по созданию спецификаций в Autodesk Revit // Технологии информационного моделирования зданий и территорий. Экосистемы ТИМ/ВІМ : мат. II Всерос. науч.-практ. конф. 2022. С. 89–97. EDN DYKVMC.
10. Пученков И.С. Обработка информации в BIM среде с помощью Dynamo на примере работы с классификатором // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 414–424. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.054. EDN DUJTDI.
11. Sadeghi M., Elliott J.W., Porro N., Strong K. Developing building information models (BIM) for building handover, operation and maintenance // Journal of Facilities Management. 2019. Vol. 17. Issue 3. Pp. 301–316. DOI: 10.1108/JFM-04-2018-0029

12. *Смышляева А.С.* Возможности автоматизированного выполнения рабочей документации для строительства в Autodesk Revit // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов института экономики, управления и информационных систем в строительстве и недвижимости. 2019. С. 633–636. EDN KRPWNA.
13. *Брантов Д.А., Ткаченко С.Н., Карпова Н.Н.* Использование платформы визуального программирования Dynamo для разработки прототипа модуля автоматизированного создания спецификаций в проектно-строительной деятельности на примере экспликации полов // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 14–17. EDN YVCHCI.
14. *Piaskowski A.K., Petersons R., Wyke S.C.S., Petrova E.A., Svidt K.* Automation of data transfer between a BIM model and an environmental quality assessment application // CIB Proceedings. 2019. Vol. 36. Pp. 381–390.
15. *Игнатова Е.В., Смышляева А.С.* Автоматизация формирования рабочей документации для строительства в Autodesk Revit // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, проводимого в рамках VI Междунар. науч. конф. 2018. С. 95–98. EDN YMJMZV.
16. *Регидо О.* Автоматизированное архитектурное проектирование в интегрированной компьютерной среде Revit-Dynamo-Excel // Danish Scientific Journal. 2020. № 38–1. С. 7–11. EDN GWOJPQ.
17. *Ларин В.С.* Применение языка Python в Dynamo Revit // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов института экономики, управления и информационных систем в строительстве и недвижимости НИУ МГСУ. 2021. С. 586–592. EDN USKGGG.
18. *Никандрова Л.В., Евтушенко С.И.* Использование технологий информационного моделирования при разработке проектной и рабочей документации // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений : мат. XIX Междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 4–9. EDN GPWDTN.
19. *Mamedmuradov Y.D., Kovalev A.I.* HVAC design in Autodesk Revit using Dynamo // AlfaBuild. 2020. No. 2 (14). P. 1402. DOI: 10.34910/ALF.14.2. EDN WNVWPL.
20. *Лемешко Р.А., Птухина И.С.* Применение надстройки «Dynamo» для автоматизированного задания общих параметров по отношению к различным элементам проекта в программе «Autodesk Revit» // Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всеросс. конф. 2022. С. 401–403. EDN USLIAP.
21. *Ignatova E., Zotkin S., Zotkina I.* The extraction and processing of BIM data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 062033. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062033. EDN GQKXOV.
22. *Мельников Д.В., Мансуров Р.Ш.* Использование инструментов визуального программирования для обработки массивов данных // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2021. Т. 24. № 3/4 (81/82). С. 49–58. DOI: 10.32683/1815-5987-2021-24-81/82-3/4-49-58. EDN GAUYPZ.
23. *Пученков И.С.* Обработка информации в BIM среде с помощью Dynamo на примере работы с классификатором // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 414–424. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.054. EDN DUJTDT.
24. *Omurtay I., Soyuluk A., Ünay A.* Use of BIM with Modular Construction in Future Construction Techniques // MANAS Journal of Engineering. 2024. Vol. 12. Issue 1. Pp. 29–33. DOI: 10.51354/mjen.1220152
25. *Заторский С.П., Шумилов К.А.* Алгоритм получения расчетных параметров инженерных систем в среде информационного моделирования // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 188–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026. EDN KCYXCZ.
26. *Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G.* 4D and 5D Design Processes Automation Using Databases, Classification and Applied Programming // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 667–675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_59
27. *Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S.* Developing a cost-predictive model for hospital construction projects // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119
28. *De Soto B.G.* A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : thesis submitted to attain the degree of doctor of sciences. Zurich : ETH Zurich, 2014. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720
29. *Семенова М.А.* Инновации в проектировании и строительстве готовых сантехнических модулей // Научный Лидер. 2023. № 3 (101). С. 13–14. EDN UQPCUH.
30. *Мотылев Р.В., Кочерыгин А.А.* Современные технологии в производстве сантехнических модулей заводской готовности с применением каркаса из ЛСТК // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 139–144. EDN KPQQCA.
31. *Bin M.A., Alrashdi A., Akhtar S., Altuwaim A., Almohsen A.* Development of a predictive model based

on the alignment tool in the early stages of projects: Sustainability. 2024. Vol. 16. Issue 18. P. 8122. DOI: 10.3390/su16188122

Поступила в редакцию 17 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 24 января 2025 г.

Одобрена для публикации 24 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Савелий Павлович Заторский** — аспирант кафедры информационных систем и технологий; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 4024-3691, ORCID: 0000-0003-4234-8454; saveliy_zatorskiy@mail.ru;

Константин Августович Шумилов — кандидат технических наук, доцент кафедры информатики; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 4916-9517, ORCID: 0000-0003-2079-6774; shkas@mail.ru.

Вклад авторов:

Заторский С.П. — концепция исследования, разработка модели, написание исходного текста и итоговые выводы.

Шумилов К.А. — научное руководство, доработка концепции исследования, доработка текста и итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ambartsumyan S.A., Mochalin D.E., Siebeva Ju.A. The practicality of modular construction: past experience and prospects. *Construction Production*. 2024; 2:61-65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI. (rus.).
2. Evsevina E.D., Vorobyov V.S. Prefab: new technologies and prospects of the construction industry. *Scientific Journal of Building Construction and Architecture*. 2024; 3(75):86-93. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.75.3.008. EDN EQWTF. (rus.).
3. Zakharova M.V., Ponomaryov A.B. Volumemodular construction's experience of buildings and structures. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2017; 2:190-198. EDN: XQHWR. (rus.).
4. SVP N., Santhosh A., Gupta A., Arshad M., Ansari A. Framework for the optimization of construction project. *African Journal of Biomedical Research*. 2024; 27(4S):4658-4669. DOI: 10.53555/AJBR.v27i4S.4457
5. Zyukina A.G., Dolzhenkova M.V. BIM design in modular architecture. *Information modeling in the tasks of construction and architecture : proceedings of VII international scientific and practical conference*. 2024; 318-324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043. EDN BIMSGK. (rus.).
6. Yeskaliyev M.Zh. Implementing information modeling in modular building: benefits and challenges. *Fundamental and Applied Research of Young Scientists : proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. 2021; 286-290. EDN AEYBMX. (rus.).
7. Bachin I.O. BIM design of modular residential buildings. *Issues of Sustainable Development of Society*. 2022; 5:1238-1246. EDN ANGZTE. (rus.).
8. Alwisy A., Hamdan S.B., Barkokebas B., Bouferguene A., Al-Hussein M. A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. *International Journal of Construction Management*. 2018; 19(3):187-205. DOI: 10.1080/15623599.2017.1411458
9. Abdelhady M.M.N., Karmanova M.M. Automation of functionality for creating specifications in Autodesk Revit. Technologies of information modeling of buildings and territories. *TIM/BIM Ecosystems : proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2022; 89-97. EDN DYKVMC. (rus.).
10. Puchenkov I.S. Information processing in the BIM environment using Dynamo on the example of working with a classifier. *BIM modeling in construction and architecture problems : proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. 2020; 414-424. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.054. EDN DUJTD. (rus.).
11. Sadeghi M., Elliott J.W., Porro N., Strong K. Developing building information models (BIM) for building handover, operation and maintenance. *Journal of Facilities Management*. 2019; 17(3):301-316. DOI: 10.1108/JFM-04-2018-0029
12. Smyshlyaeva A.S. Possibilities of automated execution of working documentation for construction in Autodesk Revit. *Days of student science : collection of reports of scientific and technical conference on the results of scientific-research works of students of the Institute of Economics, Management and Infor-*

mation Systems in Construction and Real Estate. 2019; 633-636. EDN KRPWNA. (rus.).

13. Brantov D.A., Tkachenko S.N., Karpova N.N. Using visual programming platform dynamo for development of prototype of automated module for specifications in building design on an example of explication of floors. *Science and innovations in the XXI century: current issues, discoveries and achievements : collection of articles. VIII International scientific and practical conference*. 2018; 14-17. EDN YVCHCI. (rus.).

14. Piaskowski A.K., Petersons R., Wyke S.C.S., Petrova E.A., Svidt K. Automation of data transfer between a BIM model and an environmental quality assessment application. *CIB Proceedings*. 2019; 36:381-390.

15. Ignatova E.V., Smyshlyayeva A.S. Automation of formation of working documentation for construction in Autodesk Revit. *System engineering of construction. Cyberphysical construction systems : proceedings of the seminar held within the framework of the VI International Scientific Conference*. 2018; 95-98. EDN YMJMZV. (rus.).

16. Regida O. Automated architectural design in an integrated computer environment Revit-Dynamo-Excel. *Danish Scientific Journal*. 2020; 38-1:7-11. EDN: GWOJPQ. (rus.).

17. Larin V.S. Using the Python language in Dynamo Revit. *Days of student science : collection of reports of scientific-technical conference on the results of scientific-research works of students of the Institute of Economics, Management and Information Systems in Construction and Real Estate NIU MSCU*. 2021; 586-592. EDN USKGGG. (rus.).

18. Nikandrova L.V., Evtushenko S.I. Use of information modeling technologies in the development of design and working documentation. *Information technologies in survey of operated buildings and structures : proceedings of the XIX International scientific and technical conference*. 2020; 4-9. EDN GPWDTH. (rus.).

19. Mamedmuradov Y.D., Kovalev A.I. HVAC design in Autodesk Revit using Dynamo. *AlfaBuild*. 2020; 2(14):1402. DOI: 10.34910/ALF.14.2. EDN WNVWPL.

20. Lemeshko R.A., Ptukhina I.S. Application of the Dynamo add-in for automated setting of common parameters in relation to different elements of the project in Autodesk Revit program. *ISI Science Week : proceedings of the All-Russian Conference*. 2022; 401-403. EDN USLIAP. (rus.).

21. Ignatova E., Zotkin S., Zotkina I. The extraction and processing of BIM data. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 062033. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062033. EDN GQKXOV.

22. Melnikov D.V., Mansurov R.Sh. Using visual programming tools to process data arrays. *Proceedings*

of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). 2021; 24:3/4(81/82):49-58. DOI: 10.32683/1815-5987-2021-24-81/82-3/4-49-58. EDN GAUYPZ. (rus.).

23. Puchenkov I.S. Information processing in BIM environment with the help of Dynamo on the example of work with classifier. *BIM-modeling in the tasks of construction and architecture : proceedings of the III International scientific and technical conference*. 2020; 414-424. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.054. EDN DUJTDI. (rus.).

24. Omurtay I., Soyuluk A., Ünay A. Use of BIM with Modular Construction in Future Construction Techniques. *MANAS Journal of Engineering*. 2024; 12(1):29-33. DOI: 10.51354/mjen.1220152

25. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Algorithm for obtaining design parameters of engineering systems in the information modeling environment. *Information modeling in problems of construction and architecture : proceedings of VII International scientific and technical conference*. 2024; 188-195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026. EDN KCYXCZ. (rus.).

26. Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G. 4D and 5D Design Processes Automation Using Databases, Classification and Applied Programming. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022; 247:667-675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_59

27. Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S. Developing a cost-predictive model for hospital construction projects. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2024; 1-18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119

28. De Soto B.G. *A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : thesis submitted to attain the degree of doctor of sciences*. Zurich, ETH Zurich, 2014. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720

29. Semenova M.A. Innovations in the design and construction of prefabricated sanitary modules. *Scientific Leader*. 2023; 3(101):13-14. EDN UQPCUH. (rus.).

30. Motylev R.V., Kocherigin A.A. Modern technologies in the production of factory-ready sanitary modules with the use of lightweight steel thin-walled frameworks. *Science-intensive technologies and innovations (XXV scientific readings) : proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2023; 139-144. EDN KPQQCA. (rus.).

31. Bin M.A., Alrashdi A., Akhtar S., Altuwaim A., Almohsen A. Development of a predictive model based on the alignment tool in the early stages of projects: The case of Saudi Arabia infrastructure projects. *Sustainability*. 2024; 16(18):8122. DOI: 10.3390/su16188122

Received December 17, 2024.

Adopted in revised form on January 24, 2025.

Approved for publication on January 24, 2025.

BIONOTES: **Savely P. Zatorskiy** — postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 4024-3691, ORCID: 0000-0003-4234-8454; saveliy_zatorskiy@mail.ru;

Konstantin A. Shumilov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 4916-9517, ORCID: 0000-0003-2079-6774; saveliy_zatorskiy@mail.ru.

Contribution of the authors:

Savely P. Zatorskiy — research conceptualization, model development, source writing, and final conclusions.

Konstantin A. Shumilov — scientific guidance, finalization of the research concept, finalization of the text and final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели

Елена Владиславовна Макиша

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В 2024 г. нормативно-правовыми актами была установлена обязательность разработки проектной документации, содержащей в составе цифровую информационную модель (ЦИМ). Данные изменения напрямую влияют на подходы к созданию сметной документации, предоставляя возможности по автоматизации этого процесса. Несмотря на существенный прогресс в части автоматизации формирования ведомостей объемов работ, автоматизированное назначение расценок все еще не получило широкой реализации. Основная цель исследования — систематизировать и обобщить действующие методические документы для формирования смет при проектировании с применением технологии информационного моделирования (ТИМ), утвержденные на уровне г. Москвы, и консолидировать их положения в единую концепцию, способствующую внедрению и широкому распространению автоматизации получения сметной документации.

Материалы и методы. Применены методические документы, регламентирующие разработку проектно-сметной документации с использованием ТИМ; Территориальные сметные нормативы для г. Москвы в базисном уровне цен по состоянию на 1 января 2000 г. (ТСН-2001); Московская система классификаторов (МССК).

Результаты. На основе положений методических документов изложена концепция автоматизации формирования смет при разработке проектной документации с применением ТИМ. Описаны ключевые этапы, необходимые для автоматизированного назначения расценок. Представлен алгоритм сопоставления ЦИМ с параметризованными расценками.

Выводы. Сделаны выводы о преимуществах автоматизации сопоставления расценок и элементов ЦИМ. Определены дальнейшие шаги, способствующие внедрению и более широкому распространению автоматизации получения сметной документации на основе цифровых информационных моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технология информационного моделирования, информационная модель, цифровая информационная модель, сметные нормы, расценки, проектно-сметная документация, ведомость объемов работ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макиша Е.В. Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 764–776. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.764-776

Автор, ответственный за переписку: Елена Владиславовна Макиша, MakishaEV@mgsu.ru.

Formation of estimate documentation based on a building information model

Elena V. Makisha

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

ABSTRACT

Introduction. In 2024, regulatory legal acts established the mandatory development of design documentation containing a building information model (BIM). These changes directly affect approaches to the formation of estimate documentation, providing opportunities to automate this process. Despite significant progress in automating the formation of bills of quantities (BOQ), automated pricing has not yet been widely implemented. The main objective of the study is to systematize and summarize the current methodological documents regarding the formation of estimates in design using information modeling technology, approved at the level of the city of Moscow, and consolidate their provisions into a single concept that facilitates the implementation and widespread use of automation of obtaining estimate documentation.

Materials and methods. The study used methodological documents regulating the development of design and estimate documentation using building information modelling (BIM); Territorial estimate standards for the city of Moscow at the basic price level as of January 1, 2000 (TSN 2001); Moscow system of classifiers (MSSC).

Results. Based on the provisions of the methodological documents mentioned in the previous section, the concept of automation of the formation of estimates during the development of project documentation using BIM is presented. The main stages necessary for the automated assignment of prices are described. An algorithm for comparing BIM with parameterized prices is presented.

Conclusions. Conclusions are made about the advantages of automating the comparison of prices and elements of the BIM. Further steps are defined to facilitate the implementation and wider dissemination of the automation of obtaining estimate documentation based on digital information models.

KEYWORDS: building information modelling, building information model, estimate standards, prices, design and estimate documentation, statement of work volumes

FOR CITATION: Makisha E.V. Formation of estimate documentation based on a building information model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):764-776. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.764-776 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Makisha, MakishaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Действующий порядок формирования сметы заключается в подборе соответствующих расценок на основе данных проектной документации.

При этом в 2019 г. в Градостроительном кодексе Российской Федерации¹ произошли существенные изменения: помимо текстовой и графической формы, была установлена новая форма представления проектной документации — информационная модель (ИМ). В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства»² разработка проектной документации в форме ИМ стала обязательной для объектов, строительство которых финансируется с привлечением бюджетов бюджетной системы РФ. В 2022 г. в данное постановление были внесены дополнения³, согласно которым это обязательство коснулось застройщиков и технических заказчиков, осуществляющих деятельность в соответствии с Федеральным законом «Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации».

С утверждением Постановления Правительства Российской Федерации от 17.05.2024 № 614 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строитель-

ства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов»⁴ на этапе осуществления архитектурно-строительного проектирования для всех установленных Постановлением Правительства РФ № 331 случаев стало обязательно в состав информационной модели включать цифровую информационную модель (ЦИМ), т.е. объектно-ориентированную параметрическую 3D-модель.

Такое существенное изменение формы проектной документации не могло не отразиться на подходах к формированию сметы. Если в случае двумерного проектирования в качестве исходных данных для смет выступали чертежи и спецификации, то при наличии ЦИМ появилась возможность по автоматизации как процесса формирования ведомостей объемов работ (ВОР), так и непосредственного назначения расценок.

В направлении автоматизации формирования ВОР были достигнуты определенные успехи⁵. Об этом свидетельствует значительное количество исследований [1–4] и соответствующих программных комплексов (ПК) (Larix.EST, Tangl Value). Отдельно стоит отметить такой серьезный шаг, как опубликование ФАУ «Глагосэкспертиза России» XML-схемы ВОР, в которой заложена обязательная связь с элементами модели ЦИМ. В качестве альтернативного варианта допускается установление ссылок на номера страниц проектной документации, что тем не менее является трудоемким и времязатратным процессом по сравнению с выгрузкой ВОР из ЦИМ. Применение данной XML-схемы позволяет не допускать выгрузку ВОР из сметного программного обеспечения, что изначально проти-

¹ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/866/>

² Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства : Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/183960/>

³ О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 5 марта 2021 г. № 331 : Постановление Правительства РФ от 20.12.2022 № 2357. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202212210039>

⁴ Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов : Постановление Правительства Российской Федерации от 17.05.2024 № 614. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405170050>

⁵ Об утверждении рекомендуемых образцов ведомостей объемов работ и методических рекомендаций по их заполнению : Приказ от 18.07.2024 № МКЭ-ОД/24-79. URL: <https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/307941220/>

воречило концепции ВОР как документа для обеспечения взаимосвязи «проект – смета».

При этом решение задачи автоматизации назначения расценок связано с определенными сложностями.

Изначально возникло предположение, что для назначения расценки достаточно установить ее для каждого элемента модели (рис. 1).

Однако этот подход не оправдал себя, так как в основе расценок находятся применяемые для выполнения работ технологии, а элементы ЦИМ не содержат данную информацию. Поэтому для автоматизированного назначения расценок на элементы необходимо найти способ учитывать технологию выполнения работ, в результате которых они формируются.

Решение проблемы сопоставления элементов и расценок предпринималось в ряде исследований [5–10]. В статьях [11–13] был предложен подход к взаимоувязке элементов ЦИМ и расценок из сметной нормативной базы федеральных единичных расценок (ФЕР) на основе атрибутов. Однако авторы столкнулись с тем, что в сметных нормативных базах

присутствуют дополнительные параметры, не представленные в цифровых информационных моделях.

В исследованиях [14, 15] рассмотрена возможность подсчета сметной стоимости объекта капитального строительства (ОКС) с использованием ЦИМ и ПК ABC, где назначение расценок элементам ЦИМ происходит вручную. Аналогичный подход, реализованный в других ПК (SmetaWIZARD, 5D Смета, 1С: Смета 3), описан в работах [16, 17].

В статьях [18, 19] также подсвечиваются проблемы формирования сметы на основе ЦИМ и делается вывод о том, что на данном этапе невозможно автоматически получить качественную и подробную смету из ТИМ-программы (ТИМ — технологии информационного моделирования) для промышленного строительства.

Из всего перечня исследований необходимо выделить доклад С.Н. Лавренок на Невском строительном форуме [20], в котором наиболее полно освещаются актуальные вопросы интеграции ЦИМ в сметное дело.

При этом, несмотря на то, что в некоторых странах так же, как и в России, для оценки стоимости

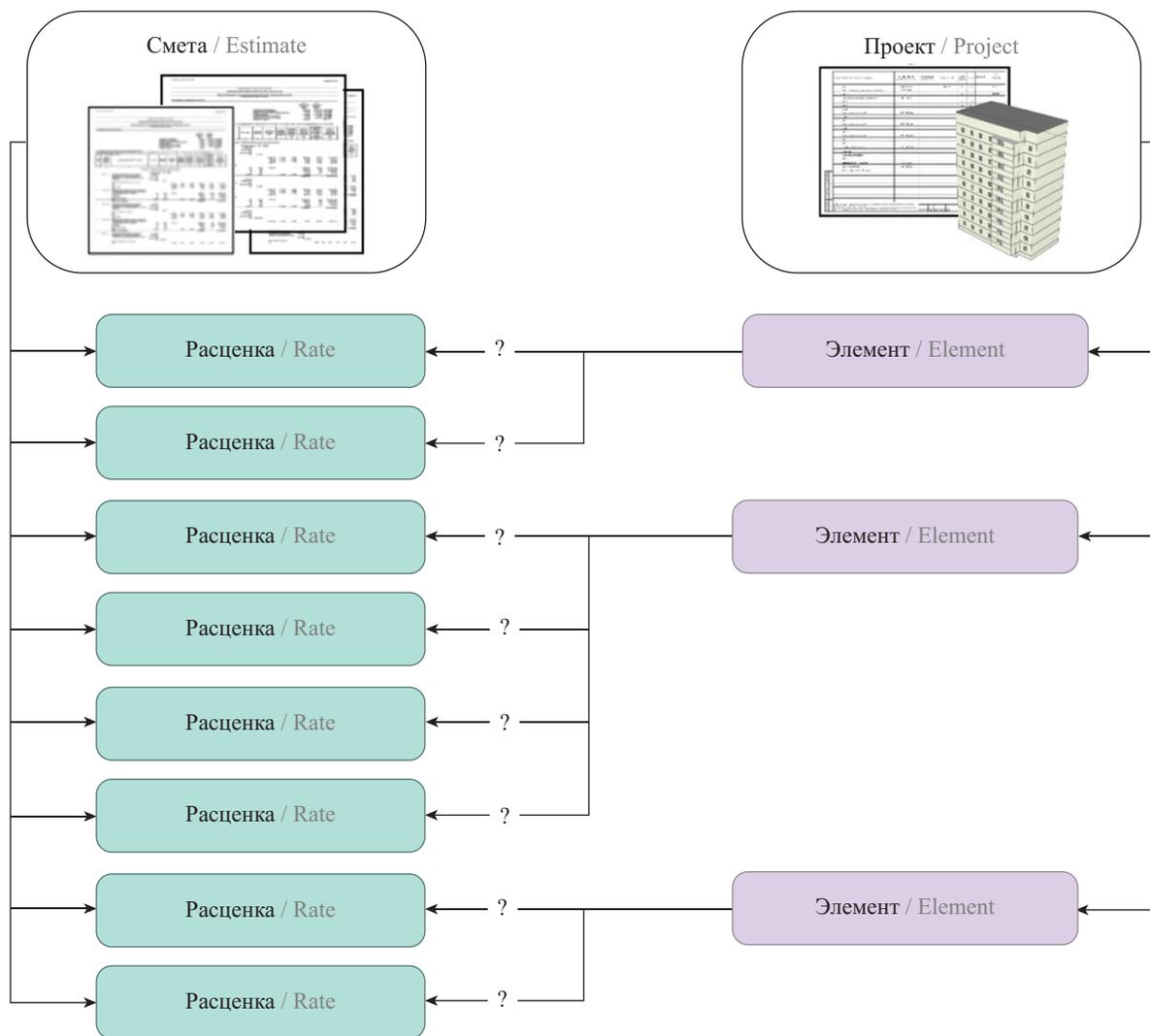


Рис. 1. Действующая концепция формирования сметы на основе ЦИМ

Fig. 1. Current concept of BIM-based cost estimation

строительства применяются сметные нормативы [21], методику автоматизации этого процесса сложно формировать на основе зарубежного опыта [22–24], так как она должна учитывать особенности национального и регионального законодательства.

Таким образом, можно сделать вывод о недостаточной освещенности данного вопроса в научных исследованиях. Тем не менее заинтересованные контролирующие органы и органы исполнительной власти различных регионов РФ стремятся обеспечить методическую поддержку применения технологий информационного моделирования. Это касается и вопроса формирования сметной документации при осуществлении проектирования с ТИМ. При этом лидирующую роль в этом отношении занимает Москва.

В данной статье будет предпринята попытка проанализировать действующие методические документы для формирования смет при проектировании с применением технологии информационного моделирования, утвержденные на уровне г. Москвы, и консолидировать их положения в единую концепцию. Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

1. Определение перечня методических документов, регламентирующих формирование смет на основе ЦИМ.
2. Анализ методических документов, регламентирующих формирование смет на основе ЦИМ.
3. Выбор системы классификаторов.
4. Описание общей концепции формирования смет на основе ЦИМ на базе проанализированных документов.
5. Определение ограничений и перспектив применения указанной концепции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях методического обеспечения процесса формирования смет при разработке проектной документации с использованием ТИМ Комитетом г. Москвы по ценовой политике в строительстве и государственной экспертизе проектов приняты следующие документы:

1. МОС.01.02-007.2003 «Методика по адаптации и параметризации сметных норм, расценок и материальных ресурсов для использования при разработке проектно-сметной документации с применением технологий информационного моделирования»⁶.
2. МОС.01.02-008.2023 «Методика по применению параметризованных норм, расценок и матери-

⁶ Об утверждении Методики по адаптации и параметризации сметных норм, расценок и материальных ресурсов для использования при разработке проектно-сметной документации с применением технологии информационного моделирования : утв. Приказом Комитета г. Москвы по ценовой политике в строительстве и государственной экспертизе проектов от 13.04.2023 № МКЭ-ОД/23-45. URL: <https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/285292220/>

альных ресурсов при разработке проектно-сметной документации с использованием технологий информационного моделирования»⁷.

В качестве базы сметных нормативов и расценок для применения и расчета сметной стоимости строительства на объектах строительства, финансируемых из бюджета г. Москвы, используются Территориальные сметные нормативы для города Москвы в базисном уровне цен по состоянию на 1 января 2000 г. (ТСН-2001)⁸. Данные нормативы были разработаны в соответствии с Постановлением Правительства Москвы от 10.08.2004 № 557-ПП «О совершенствовании территориальной сметно-нормативной базы для определения стоимости строительства объектов в городе Москве».

Для обеспечения взаимосвязи сметных нормативов и элементов ЦИМ также необходим классификатор, таблицы которого гармонизированы с ТСН-2001. Московская строительная система классификаторов (МССК) разработана ГАУ «Мосгосэкспертиза» для применения технологии информационного моделирования в Комплексе градостроительной политики и строительства города Москвы⁹. Аргументация взаимосвязи МССК и ТСН представлена в табл. 1.

Учитывая общие цели, взаимодействие, законодательную значимость и региональные особенности, приходим к выводу, что МССК и ТСН — это взаимодействующие инструменты, предназначенные для содействия специалистам в строительной сфере в создании точных и обоснованных смет, соответствующих стандартам качества и текущим экономическим условиям.

МССК, как и требуется, гармонизирован с ТСН и международным стандартом обмена данными между программами для проектирования и строительства (IFC — Industry Foundation Classes).

Следующие таблицы МССК гармонизированы и имеют прямую взаимосвязь со сметно-нормативной базой ТСН-2001:

- «Строительная техника и оборудование»;
- «Виды работ».

Следующие таблицы МССК связаны с IFC:

- «Назначение и виды деятельности»;
- «Элементы»;
- «Параметры».

⁷ Об утверждении Методики по применению параметризованных норм, расценок и материальных ресурсов при разработке проектно-сметной документации с использованием технологий информационного моделирования : утв. Приказом Комитета г. Москвы по ценовой политике в строительстве и государственной экспертизе проектов от 13.04.2023 № МКЭ-ОД/23-46. URL: <https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/285293220/>

⁸ Сборники ТСН-2001. URL: <https://niac.mos.ru/standards/tsn-2001/collectors-tsn-2001/>

⁹ МССК. URL: <https://exp.mos.ru/project-office-for-implementation-of-bim/mssk/>

Табл. 1. Обоснование применения МССК

Table 1. Justification for the use of MSSC

Критерий Criterion	TCH / TSN	МССК / MSSC
Назначение Purpose	Сметные расчеты TCH-2001 содержит нормативы и цены, которые используются для составления сметных расчетов на основе классификаций, предоставленных МССК Estimated calculations TSN-2001 contains standards and prices that are used to prepare estimated calculations based on classifications provided by the MSSC	Классификация МССК представляет унифицированную систему классификации строительных ресурсов, работ и услуг, что позволяет стандартизировать и упорядочить сметное дело в строительстве, а также выполнить классификацию элементов ЦИМ Classification MSSC represents a unified system of classification of construction resources, works and services, which allows standardization and streamlining of estimating in construction, as well as classification of BIM elements
Взаимная интеграция Mutual integration	Классификаторы МССК могут быть интегрированы с TCH-2001 для обеспечения более эффективного процесса составления сметы, так как TCH предполагает использование определенных материалов и работ, которые должны соответствовать классификаторам МССК MSSC classifiers can be integrated with TSN-2001 to ensure a more efficient estimate preparation process, since TSN assumes the use of certain materials and works that must comply with MSSC classifiers	
Актуализация данных Data update	Изменения в классификаторах МССК могут требовать пересмотра и обновления данных в базе TCH-2001, чтобы сметные нормы оставались актуальными и соответствовали текущим условиям рынка Changes in the MSSC classifiers may require revision and updating of data in the TSN-2001 database so that the estimate standards remain relevant and correspond to current market conditions	
Юридическая сила Legal force	TCH-2001, как и МССК, имеет юридическую силу в пределах установленного регионального применения и должен использоваться при оценке стоимости строительных работ в Москве TSN-2001, like MSSC, has legal force within the limits of established regional application and should be used when assessing the cost of construction work in Moscow	
Региональная специфика Regional specificity	TCH-2001 отражает специфику стоимости ресурсов и работ в Москве, что важно учитывать при использовании вместе с МССК, который может быть адаптирован под региональные особенности TSN-2001 reflects the specifics of the cost of resources and work in Moscow, which is important to consider when used together with the MSSC, which can be adapted to regional characteristics	

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщая положения методических документов, можно изложить концепцию автоматизации формирования смет при разработке проектной документации с применением ТИМ (рис. 2).

1. Параметризация сметно-нормативной базы

На первом этапе необходимо преобразование сметно-нормативной базы в формат, пригодный для автоматизированного сопоставления с элементами (сборками элементов) ЦИМ. Для этих целей реализуется процесс параметризации.

Параметризация сметно-нормативной базы предполагает определение перечня параметров и атрибутов у сметных норм. При этом атрибуты используются для структурирования расценок на основе атрибутивного сходства и для первичного сопоставления с атрибутами элементов ЦИМ. Могут быть представлены в алфавитно-цифровом виде. Параметры позволяют подобрать единственную расценку для элемента ЦИМ по геометрическим и физическим признакам из уже отобранных по атрибутивному значению, имеют числовой тип данных.

2. Формирование проектных сборок

На втором этапе следует выполнить объединение элементов ЦИМ в сборки и определение соответствующих им групп предварительно параметризованных расценок (рис. 3). В качестве исходной информации для сопоставления используются статистические данные по назначению расценок, собранные на основе проектно-сметной документации, прошедшей экспертизу. При этом возможности статистической обработки данных значительно возросли с принятием XML-схем для ведомости объемов работ результатов конъюнктурного анализа, объектного, сводного и локального сметного расчета.

В «Методике по адаптации и параметризации сметных норм, расценок и материальных ресурсов для использования при разработке проектно-сметной документации с применением технологий информационного моделирования» этот процесс называется разработкой проектно-сметных модулей (ПСМ). Проектно-сметный модуль — это информационная система для сопоставления данных между графическим элементом (комплексом элементов) цифровой информационной модели, результирующей продукцией, технологическими процессами,

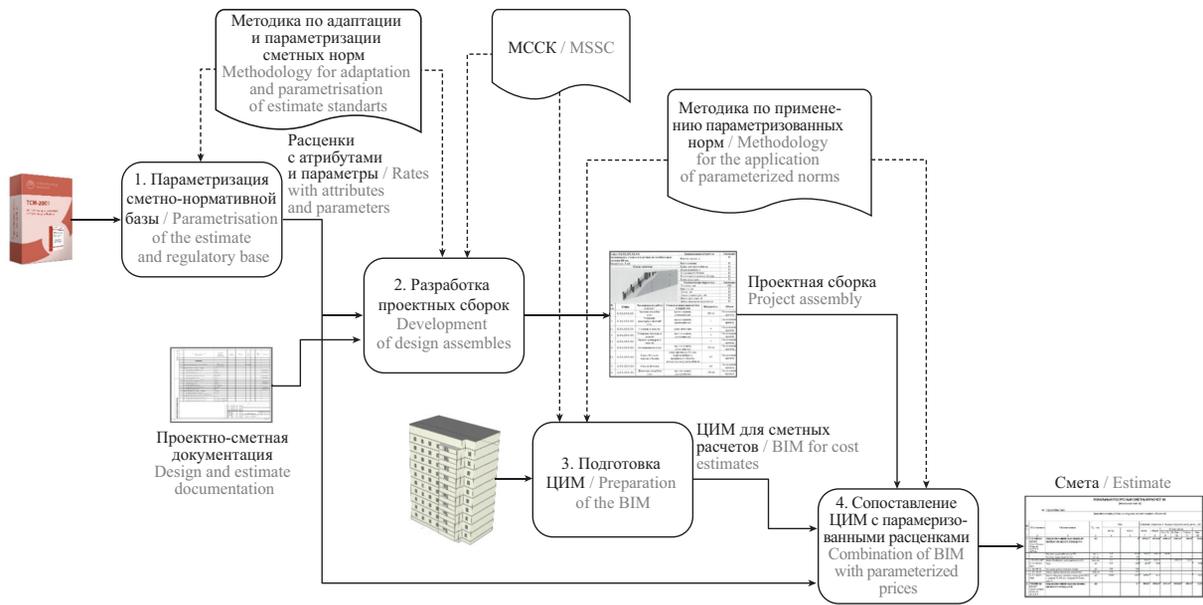


Рис. 2. Блок-схема автоматизации формирования смет
 Fig. 2. Block diagram of automation of estimates formation

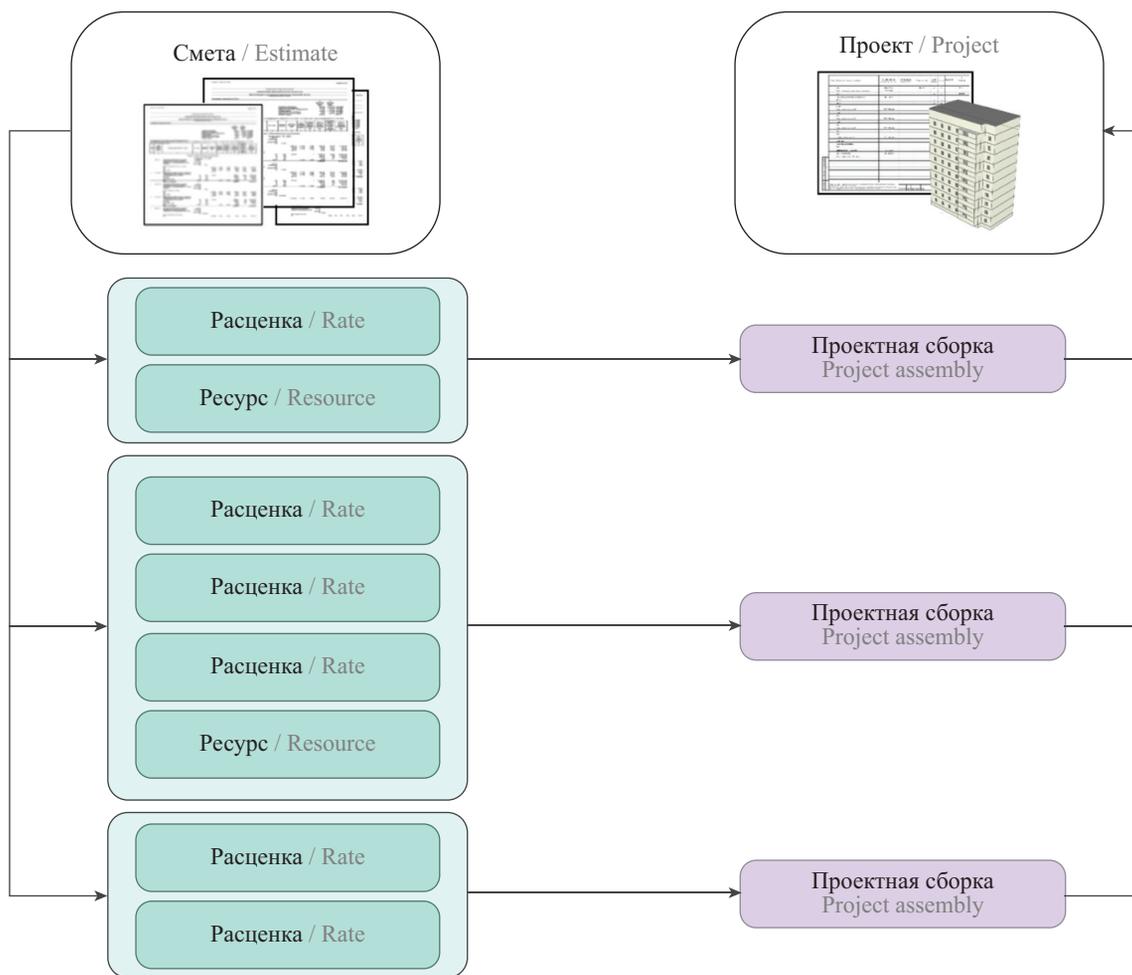


Рис. 3. Принцип назначения расценок проектным сборкам
 Fig. 3. Principle of assigning prices to design assemblies

Табл. 2. Семантический подбор расценок для проектной сборки

Table 2. Semantic selection of prices for project assembly

№	Шифр таблицы/группы/расценки или ресурса	Наименование	Измеритель	Сопоставление параметров и атрибутов	Формула объема	Атрибуты/параметры			Расположение
						Элемент	Материал	Способ производства работ	
1	3.6-74	Монтаж опалубки монолитных Ж/бетонных конструкций подпольной и цокольной частей здания	100 м2	Элемент	Площадь/100	Элемент	Железобетон	Монтаж опалубки подпольной/цокольной	Расположение подпольной/цокольной
1.1	3.6-74-1	Монтаж опалубки монолитных железобетонных конструкций стен подпольной и цокольной частей здания	100 м2	Элемент	Площадь/100	Элемент	Железобетон	Монтаж опалубки подпольной/цокольной	Расположение подпольной/цокольной
2	3.6-75	Демонтаж опалубки монолитных Ж/бетонных конструкций подпольной и цокольной частей здания	100 м2	Элемент	Площадь/100	Элемент	Железобетон	Демонтаж опалубки подпольной/цокольной	Расположение подпольной/цокольной
2.1	3.6-75-1	Демонтаж опалубки монолитных железобетонных конструкций стен подпольной и цокольной частей здания	100 м2	Элемент	Площадь/100	Элемент	Железобетон	Демонтаж опалубки подпольной/цокольной	Расположение подпольной/цокольной
3	3.6-76	Установка вертикальных каркасов железобетонных конструкций подпольной и цокольной частей здания	1 т	Элемент/способ производства работ	Масса	Элемент	Железобетон	Установка каркасов и стоек	Расположение подпольной/цокольной
3.1	3.6-76-1	Установка вертикальных каркасов и стоек в опалубку монолитных железобетонных конструкций стен подпольной и цокольной частей здания	1 т	Элемент	Масса	Элемент	Железобетон	Установка каркасов и стоек	Расположение подпольной/цокольной
3.1	0930110000	Арматурные заготовки - каркасы и сетки	т	Материал; класс; диаметр	Масса	Элемент	Материал	Классификация	Диаметр шаг
3.2	1.3-4-1	Арматурные заготовки (сетки, хомуты и т.д.), не собранные в каркасы или сетки, углеродистая сталь общего назначения и арматурная сталь гладкая, класс А-1, диаметр от 6 до 7 мм	т	Элемент	Масса	Элемент	Углеродистая сталь гладкая	А-1	10 10 мм мм
4	3.6-77	Бетонирование по схеме "кран-бульдозер" монолитных железобетонных конструкций подпольной и цокольной частей здания	100 м3	Элемент; расположение; толщина; сторона поперечного сечения; площадь перекрытия	Объем/100	Элемент	Материал	Способ производства работ	Толщина шаг тип
4.1	3.6-77-1	Бетонирование по схеме "кран-бульдозер" монолитных железобетонных конструкций стен подпольной и цокольной частей здания, толщина до 100 мм	100 м3	Элемент	Объем/100	Элемент	Железобетон	Бетонирование по схеме "кран-бульдозер"	подпольное 150 200 мм мм 3
4.1	5745010000	Смеси бетонные, БСТ, тяжелого бетона	м3	Тип; класс; марка; размер	Объем	Тип	Класс	Марка	Размер шаг
4.1	1.3-1-38	Смесь бетонная тяжелого бетона БСТ на гранитном щебне, фракция заполнителя от 5 до 20 мм, класс прочности В15 (М200), ПЗ, F50-100, W2	м3	Элемент	Объем	Гранитный щебень	В15	М200	5 20 мм мм
№	Tablety output code or resource code	Name	Unit of measurement	Matching parameters and attributes	Volume formula	Attributes/parameters			Location
						Element	Material	Method of production of works	
1	3.6-74	Installation of formwork for monolithic reinforced concrete structures of the underground and basement parts of the building	100 m2	Element	Area/100	Element	Reinforced concrete	Installation of formwork	basement
1.1	3.6-74-1	Installation of formwork for monolithic reinforced concrete structures of the walls of the underground and basement parts of the building	100 m2	Element	Area/100	Element	Reinforced concrete	Installation of formwork	basement
2	3.6-75	Dismantling of formwork of monolithic reinforced concrete structures of the underground and basement parts of the building	100 m2	Element	Area/100	Element	Reinforced concrete	Dismantling of formwork	basement
2.1	3.6-75-1	Dismantling of formwork of monolithic reinforced concrete structures of the walls of the underground and basement parts of the building	100 m2	Element	Area/100	Element	Reinforced concrete	Dismantling of formwork	basement
3	3.6-76	Installation of reinforcement products, frames and sets in the formwork of monolithic reinforced concrete structures of the walls of the underground and basement parts of the building	1 t	Element; method of production of works	Weight	Element	Material	Method of production of works	Location
3.1	3.6-76-1	Installation of reinforcement products, frames and sets in the formwork of monolithic reinforced concrete structures of the walls of the underground and basement parts of the building	1 t	Element	Weight	Element	Material	Method of production of works	Location
3.1	0930110000	Reinforcement blanks - frames and meshes	t	Material; class; diameter	Weight	Element	Material	Reinforcement class	Diameter to unit of mass. step
3.2	1.3-4-1	Reinforcement blanks (rods, strips, etc.), not assembled into frames or meshes, general purpose carbon steel and smooth reinforcing steel, class A-1, diameter from 6 to 7 mm	t	Element	Weight	Element	Carbon steel smooth	A-1	10 10 mm mm
4	3.6-77	Concreting of monolithic reinforced concrete structures of the underground and basement parts of the building using the "crane-bulldozer" scheme	100 m3	Element; location; thickness of cross-sectional side; overlap area	Volume/100	Element	Material	Method of production of works	Location Weight unit of mass. step type
4.1	3.6-77-1	Concreting using the "crane-bulldozer" scheme of monolithic reinforced concrete structures of the walls of the underground and basement parts of the building, thickness up to 100 mm	100 m3	Element	Volume/100	Element	Reinforced concrete	Concreting using the "crane-bulldozer" scheme	basement 150 200 mm mm 3
4.1	5745010000	Concrete mixtures, ready-made concrete mixtures (BMC/M)	m3	Type; class; brand; size	Volume	Type	Class	Brand	Size unit of mass. step
4.1	1.3-1-38	Concrete mixture of heavy concrete on granite crushed stone, aggregate size from 5 to 20 mm, strength class B15 (M200), P3, F50-100, W2	m3	Element	Volume	Granite crushed stone	B15	M200	5 20 mm mm

Табл. 3. Подбор расценок для проектной сборки на основе классификатора
Table 3. Selection of prices for project assembly based on the classifier

№	Шифр таблицы расценок или ресурса	Наименование	Измеритель	Составляющие элементов и единицы	Формула сборки	Атрибутивные параметры					
						07.2P (MCCS)	08.1M (MCCS)	Способ производства работ	13.1P (MCCS)	Расположение	06.1D (MCCS)
1	3.6-74	Монтаж опалубки железобетонных конструкций подвальной и цокольной частей здания	100 м ²	Элемент	Площадь 100	Материал	08.1M (MCCS)	Способ производства работ	13.1P (MCCS)	Расположение	06.1D (MCCS)
1.1	3.6-74.1	Монтаж опалубки монокристаллических конструкций стен подвальной и цокольной частей здания	100 м ²	Стена	Площадь 100	Железобетон	CT 00 15	Монтаж опалубки	PP 40 05 18	подвальные помещения	PP 23 04 / PP 23 06
2	3.6-75	Демонтаж опалубки монокристаллических конструкций подвальной и цокольной частей здания	100 м ²	Элемент	Площадь 100	Материал	08.1M (MCCS)	Способ производства работ	13.1P (MCCS)	Расположение	06.1D (MCCS)
2.1	3.6-75.1	Демонтаж опалубки монокристаллических конструкций стен подвальной и цокольной частей здания	100 м ²	Стена	Площадь 100	Железобетон	CT 00 15	Демонтаж опалубки	PP 40 05 22	подвальные помещения	PP 23 04 / PP 23 06
3	3.6-76	Установка армирующих стержней монокристаллических конструкций подвальной и цокольной частей здания	1 т	Элемент/способ производства работ	Масса	Материал	08.1M (MCCS)	Способ производства работ	13.1P (MCCS)	Расположение	06.1D (MCCS)
3.1	3.6-76.1	Установка армирующих стержней, каркасов в стенах и опалубку железобетонных конструкций стен подвальной и цокольной частей здания	1 т	Стена	Масса	Железобетон	CT 00 15	Установка каркасов в стены	PP 40 05 18	подвальные помещения	PP 23 04 / PP 23 06
3.1	09011000	Армирование железобетонных конструкций	т	Материал, класс, диаметр	Масса	Материал	08.1M (MCCS)	Класс, диаметр	13.1P (MCCS)	Параметр	13.1P (MCCS)
3.2	1.3-1-1	Армирование железобетонных конструкций в каркасах в стенах, колоннах и т.д., из стальной проволоки класса А-1, диаметром от 6 до 7 мм	т	Каркасная сталь	Масса	Углеродистая сталь	CT 00 19 10	A-1	Диаметр	PP 40 21 19	
4	3.6-77	Обеспечение стенок "ранд-блот" монокристаллических конструкций подвальной и цокольной частей здания	100 м ²	Элемент/способ производства работ	Объем 100	Материал	08.1M (MCCS)	Способ производства работ	13.1P (MCCS)	Расположение	06.1D (MCCS)
4.1	3.6-77.1	Обеспечение стенок "ранд-блот" монокристаллических конструкций стен подвальной и цокольной частей здания, высотой до 10 м	100 м ²	Стена	Объем 100	Железобетон	CT 00 15	Демонтаж стенок стенок "ранд-блот"	PP 40 18 15	подвальные помещения	PP 23 04
4.1	51601000	Смена блоков БСГ, пеноблоков	м ³	Тип, класс, марка, размер	Объем	Класс	08.1M (MCCS)	Марка	13.1P (MCCS)	Параметр	13.1P (MCCS)
4.1	1.3-1-58	Смена блоков пенобетона БСГ на гранитный щебень, пористый известняк от 5 до 20 мм, класс прочности В15 (ГОСТ 25383-2005, МС)	м ³	Гранитный щебень	Объем	В15	М200				

№	Таблица расценок или ресурса	Name	Unit of measurement	Matching parameters and attributes	Volume formula	Атрибутивные параметры					
						07.EL (MSSC)	08.3M (MSSC)	Method of production of work	13.1V (MSSC)	Location	06.1Z (MSSC)
1	3.6-74	Installation of framework for monolithic reinforced concrete structure of the underground and basement parts of the building	100 m ²	Element	Area 100	Material	08.3M (MSSC)	Method of production of work <td>13.1V (MSSC) <td>Location</td> <td>06.1Z (MSSC)</td> </td>	13.1V (MSSC) <td>Location</td> <td>06.1Z (MSSC)</td>	Location	06.1Z (MSSC)
1.1	3.6-74.1	Installation of framework for monolithic reinforced concrete structure of the walls of the underground and basement parts of the building	100 m ²	Walls	Area 100	Reinforced concrete	ST 00 15	Installation of framework	VR 10 05 18	basement	PP 23 04 / PP 23 06
2	3.6-75	Dismantling of framework of monolithic reinforced concrete structure of underground and basement parts of the building	100 m ²	Element	Area 100	Material	08.3M (MSSC)	Method of production of work <td>13.1V (MSSC)</td> <td>Location</td> <td>06.1Z (MSSC)</td>	13.1V (MSSC)	Location	06.1Z (MSSC)
2.1	3.6-75.1	Dismantling of framework of monolithic reinforced concrete structure of underground and basement parts of the building	100 m ²	Walls	Area 100	Reinforced concrete	ST 00 15	Dismantling of framework	VR 10 05 22	basement	PP 23 04 / PP 23 06
3	3.6-76	Installation of reinforcement products of monolithic reinforced concrete structure of the underground and basement parts of the building	1 т	Element/method of production of work	Weight	Material	08.3M (MSSC)	Method of production of work <td>13.1V (MSSC)</td> <td>Location</td> <td>06.1Z (MSSC)</td>	13.1V (MSSC)	Location	06.1Z (MSSC)
3.1	3.6-76.1	Installation of reinforcement products of monolithic reinforced concrete structure of the walls of the underground and basement parts of the building	1 т	Walls	Weight	Reinforced concrete	ST 00 15	Installation of frames and grids	VR 10 05 18	basement	PP 23 04 / PP 23 06
3.1	09011000	Reinforcement blocks - frame and mesh	т	Material, class, diameter	Weight	Material	08.3M (MSSC)	Reinforcement class	13.1P (MSSC)	Parameter	13.1P (MSSC)
3.2	1.3-1-1	Reinforcement blocks (frame, mesh, etc.), net meshed bars, frames or meshed square frame carbon steel and stainless reinforcing steel, class A-1, diameter from 6 to 7 mm	т	Frames' grids	Weight	Carbon steel mesh	ST 00 19 10	A-1	Диаметр	PP 40 21 19	
4	3.6-77	Conversion of monolithic reinforced concrete structure of the underground and basement parts of the building using the "crane-block" scheme	100 m ³	Element/location/condition/structure/size, composition	Volume 100	Material	08.3M (MSSC)	Method of production of work <td>13.1V (MSSC)</td> <td>Location</td> <td>06.1Z (MSSC)</td>	13.1V (MSSC)	Location	06.1Z (MSSC)
4.1	3.6-77.1	Conversion using the "crane-block" scheme of monolithic reinforced concrete structure of the walls of the underground and basement parts of the building, thickness up to 10 mm	100 m ³	Walls	Volume 100	Reinforced concrete	ST 00 15	Conversion using the "crane-block" scheme	VR 10 05 17	basement	PP 23 04
4.1	51601000	Conversion of heavy concrete on granite crushed stone, aggregate of granite and limestone of class B15 (ГОСТ 25383-2005, МС)	м ³	Type, class, brand, size	Volume	Class	08.3M (MSSC)	Brand	13.1P (MSSC)	Parameter	13.1P (MSSC)
4.1	1.3-1-58	Concrete structure of heavy concrete on granite crushed stone, aggregate of granite and limestone of class B15 (ГОСТ 25383-2005, МС)	м ³	Granite crushed stone	Volume	В15	М200				

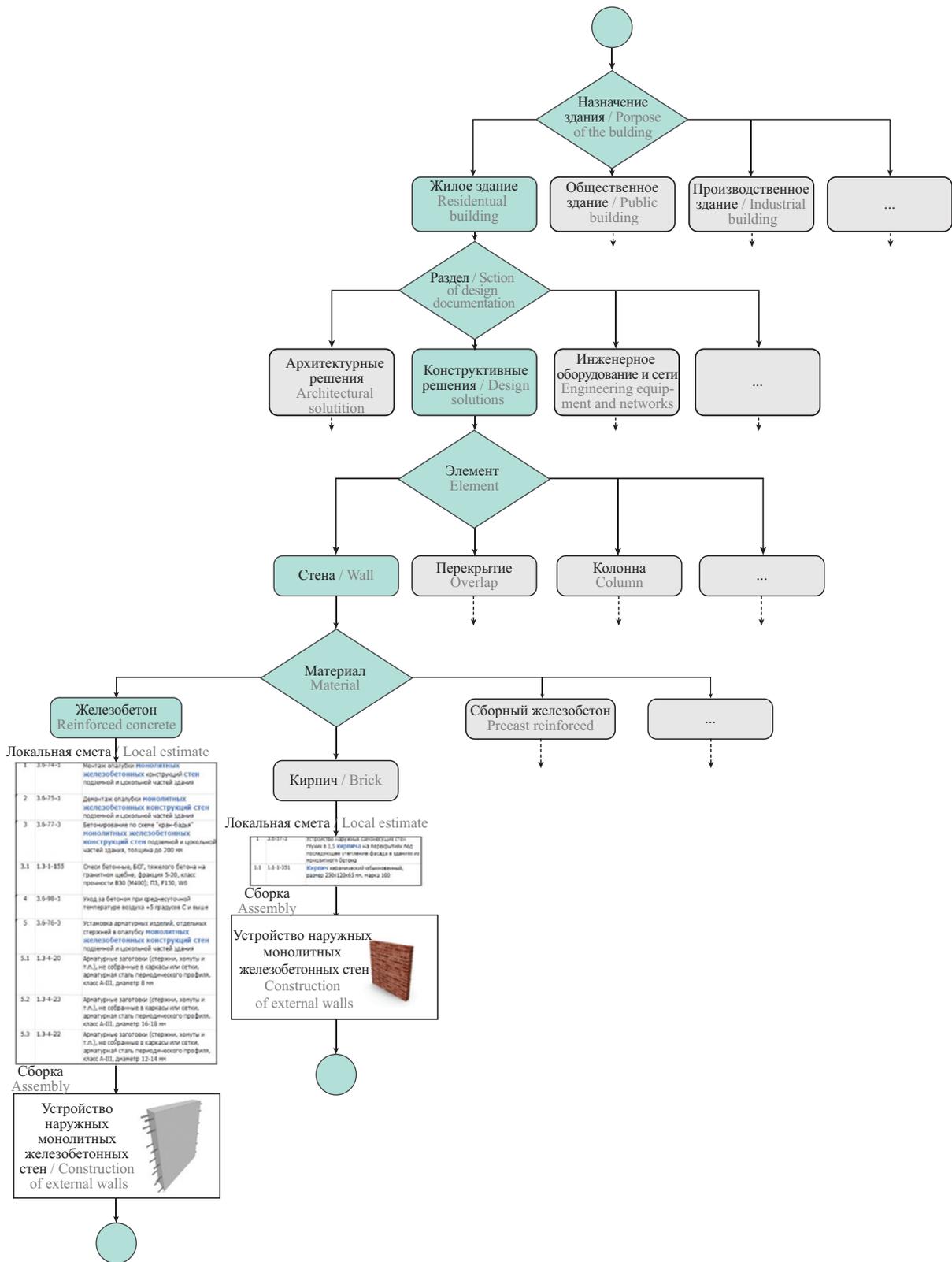


Рис. 4. Пример работы алгоритма подбора расценок

Fig. 4. Example of the algorithm for selecting prices

материально-техническими ресурсами, оборудованием и информацией о затратах.

В табл. 2 представлены параметризованные расценки, соответствующие проектной сборке «Стена», определенные на основе семантического поиска.

При кодировании параметризованных расценок, а также элементов и параметров ЦИМ в соответствии с МССК возможно выполнять сопоставление проектных сборок и расценок на основе кодов классификатора (табл. 3).

3. Подготовка ЦИМ

При подготовке ЦИМ необходимо в первую очередь руководствоваться Требованиями к информационным моделям, утвержденными приказом от 26.06.2019 № МКЭ-ОД/19-39 «Об утверждении требований к информационным моделям объектов капитального строительства, а также классификаторов для информационного моделирования» (с изменениями на 10.10.2024)¹⁰. В дополнение должны также применяться рекомендации в части атрибутивного состава ЦИМ по разделам проектной документации, изложенные в «Методике по применению параметризованных норм, расценок и материальных ресурсов при разработке проектно-сметной документации с использованием технологий информационного моделирования».

4. Сопоставление ЦИМ с параметризованными расценками

Подбор расценок выглядит согласно алгоритму, представленному на рис. 4.

В соответствии с приведенным алгоритмом (рис. 4) назначаются расценки и ресурсы, соответствующие элементам ЦИМ. Объемы для расценок и ресурсов определяются на основе проектных данных ЦИМ. Для элементов с одинаковыми параметрами и технологией работы рассчитывается общий объем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

За счет последовательного выполнения описанных этапов сопоставление ЦИМ с расценками и ресурсами выполняется в соответствии со следующими принципами:

1. Расчет сметной стоимости формируется на основании сопоставления имеющейся информа-

¹⁰ Об утверждении требований к информационным моделям объектов капитального строительства, а также классификаторов для информационного моделирования : Приказ от 26.06.2019 № МКЭ-ОД/19-39. URL: <https://docs.cntd.ru/document/608864464>

ции о проектируемом объекте с параметризованной и адаптированной сметной базой.

2. Осуществляется связь между фактически объемами работ и необходимыми ресурсами без промежуточной ручной обработки.

3. Появляется возможность работать с большим объемом данных, полученных из цифровой информационной модели.

4. Формируется динамичная сметная документация, автоматизировано реагирующая на изменения в проекте.

Дальнейшими шагами, способствующими применению данной концепции, являются:

- гармонизация классификатора «Элементы» с ТСН-2001;
- гармонизация классификаторов «Строительные изделия и материалы», «Строительная техника и оборудование» с расценками и ресурсами, применяемыми при разработке смет (на основе статистических данных, по сметам с положительным заключением экспертизы);
- развитие классификатора «Виды работ» в части гармонизации не только со сборником ТСН-2001.3 «Сборники норм и расценок на строительные работы», но и с остальными сборниками;
- создание классификатора сборок на основе разработанных проектно-сметных модулей.

Автоматизация формирования смет на основе ЦИМ позволит получить следующие результаты:

1. Возможность формирования технологической последовательности работ с учетом различных видов строительства.
2. Оценка технико-экономических показателей объекта строительства.
3. Оценка стоимости строительства в выбранных единицах измерения.
4. Возможность отслеживания тенденций в изменении стоимости.
5. Возможность получения оповещения об изменении стоимости.

В итоге: динамическая оценка стоимости жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сосин О.В.* Особенности метода разработки цифровой ведомости объемов работ с применением ТИМ // Теория и практика современной науки : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 49–53. EDN JEQDCQ.

2. *Жаров Я.В., Шабалин М.С.* Цифровая ведомость объемов работ — инструмент проверки цифровых информационных моделей // Строительное производство. 2023. № 2. С. 33–37. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_33. EDN QEААНА.

3. *Соколова В.В., Шершнев Д.Д.* Анализ средств автоматизации расчета объемов работ для сметных расчетов с использованием информационного моделирования на базе Revit – 5D смета // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 177–180. EDN JZLQNU.

4. *Смирнова Н.А., Судариков В.В., Шейкин А.А.* Классификация данных цифровой информационной модели, выпуск ведомостей объемов работ и смет в системе «1С:СМЕТА ТИМ КОРП» // Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве

: мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 88. EDN PSYRWP.

5. *Каракозова И.В., Прохорова Ю.С.* Совершенствование процесса управления стоимостью строительства объекта в условиях цифровой трансформации отрасли // *Строительство и архитектура*. 2021. Т. 9. № 3. С. 56–60. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-56-60. EDN FYBFXF.

6. *Каракозова И.В., Иванов Д.Н., Позднякова П.О.* Пути решения проблем управления стоимостью строительства в условиях цифровизации // *Экономические и управленческие технологии XXI века: теория и практика, подготовка специалистов* : мат. Междунар. метод. и науч.-практ. конф. имени доктора экономических наук, профессора Т.Р. Терёшкиной. 2023. С. 68–73. EDN VAYTLG.

7. *Юдина А.А., Юдин М.Д., Крутилова М.О.* Перспективы использования BIM-смет в управлении стоимостью строительства // *Современные методы организации и управления строительством* : сб. ст. молодых ученых, аспирантов, молодых специалистов, студентов. 2020. С. 26–30. EDN SJKKYX.

8. *Насонова К.С., Мустакимова К.Н.* Цифровая трансформация сметного дела с применением технологий информационного моделирования // *Инновационные процессы в науке и технике XXI века* : мат. XX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. 2023. С. 172–178. EDN EIEMAE.

9. *Ещенко Е.М., Алешина И.А.* Информационное моделирование в сметном деле: BIM-технологии // *Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты* : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Брянского государственного инженерно-технологического университета. 2020. С. 292–295. EDN FATYLV.

10. *Алешина И.А.* Возможности использования BIM-технологий при формировании сметной стоимости строительства // *Инновации в строительстве – 2020* : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию строительного института ФГБОУ ВО «БГИТУ». 2020. С. 492–495. EDN CNMFIR.

11. *Тюрин И.А., Гинзбург А.В.* Автоматизация составления сметной документации с применением технологий информационного моделирования // *Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019* : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 525–531. EDN ZOXC DJ.

12. *Tyurin I.A., Ginzburg A.V.* Increasing the economic efficiency of design and construction solutions due to the automated identification of construction works and structural elements of information models // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1083. P. 012076. DOI: 10.1088/1757-899x/1083/1/012076

13. *Тюрин И.А.* Определение сметной стоимости строительства на ранних стадиях жизненного цикла инвестиционно-строительных проектов // *Строительство и архитектура*. 2022. Т. 10. № 1. С. 86–90. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-10-1-86-90. EDN RMTIAU.

14. *Хаймин Д.И.* Формирование сметной стоимости объекта капитального строительства с применением

цифровой информационной модели // *Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2022* : сб. науч. ст. 11-й Междунар. молодежной науч. конф. 2022. С. 554–556. EDN MNHPKT.

15. *Жданова Е.А.* Формирование сметной стоимости объекта капитального строительства с применением цифровой информационной модели // *Молодежь и системная модернизация страны* : сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. 2022. С. 158–160. EDN AQMKKE.

16. *Каргин А.А., Хрусталева Б.Б., Глазкова С.Ю.* Особенности определения сметной стоимости объекта при использовании технологии информационного моделирования // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2021. № 6 (37). С. 67–72.

17. *Малахова В.В., Замша О.Н.* Анализ отечественных программных комплексов оценки стоимости объектов капитального строительства с применением ТИМ технологий // *Экономика строительства и природопользования*. 2024. № 2 (91). С. 84–93. EDN JWEOQX.

18. *Игнатъев А.В., Боркунов В.А., Рябова Е.А., Панов А.В., Иванов В.В., Адамия Д.Д.* Разработка методики формирования сметы строительного объекта на основе его информационной модели // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 12 (84). С. 488–495. EDN ENHJLP.

19. *Боркунов В.А.* Методика формирования сметы строительного объекта на основе его информационной модели // *European Science Forum* : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 42–46. EDN OVYQLW.

20. *Лавреняк С.Н.* Интеграция BIM-моделей в сметное дело: больше, чем просто 3D. Создание сметной документации на основе ЦИМ — реальный уход от рутины и оптимизация затрат. Практические кейсы и решения. Цифровой BOP // *Невский строительный форум*. 2024.

21. *Каракозова И.В.* Зарубежный опыт определения сметных затрат на возведение строительных объектов // *Вестник МГСУ*. 2011. № 6. С. 61–65. EDN OWFRSD.

22. *Franco J., Mahdi F., Abaza H.* Using Building Information Modeling (BIM) for Estimating and Scheduling, Adoption Barriers // *Universal Journal of Management*. 2015. Vol. 3. Issue 9. Pp. 376–384. DOI: 10.13189/ujm.2015.030905

23. *Plebankiewicz E., Zima K., Skibniewski M.* Analysis of the First Polish BIM-Based Cost Estimation Application // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 123. Pp. 405–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.064

24. *Rahimi M.Z., Khan H.* Building Information Model for Cost Estimation and Scheduling in Building Architecture // *Global Journal of Engineering Design & Technology*. 2024. DOI: 10.35248/2319-7293.24.13.202

Поступила в редакцию 14 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Елена Владиславовна Макиша — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 860246; MakishaEV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Sosin O.V. Features of the method for developing a digital report of work scope using TIM. *Theory and practice of modern science : collection of articles XIV International scientific conference*. 2024; 49-53. EDN JEQDCQ. (rus.).
2. Zharov Ya.V., Shabalin M.S. Digital bill of quantities — a tool for checking building information models. *Construction Production*. 2023; 2:33-37. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_33. EDN QEAAHA. (rus.).
3. Sokolova V.V., Shershneva D.D. Analysis of automation tools for calculation of volumes of work for estimate calculations using information modeling based on Revit – 5D estimate. *Polzunovsky almanac*. 2022; 1:177-180. EDN JZLQNU. (rus.).
4. Smirnova N.A., Sudarikov V.V., Sheikin A.A. Classification of digital information model data, release of work volume statements and estimates in the “1C:ESTIMATE TEAM CORP SYSTEM”. *New information technologies in architecture and construction : proceedings of the VII International scientific and practical conference*. 2024; 88. EDN PSYRWP. (rus.).
5. Karakozova I., Prohorova Yu. Improving the process of managing the cost of construction of an object in the context of digital transformation of the industry. *Construction and Architecture*. 2021; 9(3):56-60. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-56-60. EDN FYBFXF. (rus.).
6. Karakozova I., Ivanov D., Pozdnyakova P. Ways to solve the problems of managing the cost of construction in the conditions of digitalization. *Economic and management technologies of the 21st century: theory and practice, training of specialists : proceedings of the International methodological and scientific-practical conference named after Doctor of Economics, Professor T.R. Tereshkina*. 2023; 68-73. EDN VAYTLG. (rus.).
7. Yudina A.A., Yudin M.D., Krutilova M.O. Prospects for BIM-estimates in the construction cost management. *Modern methods of organization and management of construction : collection of articles by young scientists, graduate students, young specialists, students*. 2020; 26-30. EDN SJKKYX. (rus.).
8. Nasonova K.S., Mustakimova K.N. Digital transformation of the estimate business with the use of information modeling technologies. *Innovative processes in science and technology of the 21st century : proceedings of the 20th International scientific and practical conference of students, postgraduates, scientists, teachers and practitioners*. 2023; 172-178. EDN EIEMAE. (rus.).
9. Eshchenko E.M., Aleshina I.A. Information modeling in budget planning: BIM technologies. *Digital Region: Experience, Competence, Projects : collection of articles of the III International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Bryansk State University of Engineering and Technology*. 2020; 292-295. EDN FATYLX. (rus.).
10. Aleshina I.A. Possibilities of using BIM technologies in forming estimated construction costs. *Innovations in Construction – 2020 : collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the construction institute of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “BGTU”*. 2020; 492-495. EDN CNMFIR. (rus.).
11. Tyurin I.A., Ginzburg A.V. Automation of preparation of estimate documentation using information modeling technologies. *Construction systems engineering. Cyber-physical construction systems – 2019 : collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 2019; 525-531. EDN ZOXC DJ. (rus.).
12. Tyurin I.A., Ginzburg A.V. Increasing the economic efficiency of design and construction solutions due to the automated identification of construction works and structural elements of information models. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 1083:012076. DOI: 10.1088/1757-899x/1083/1/012076
13. Tyurin I. Determination of the estimated cost of construction at the early stages of the life cycle of investment and construction projects. *Construction and Architecture*. 2022; 10(1):86-90. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-10-1-86-90. EDN RMTIAU. (rus.).
14. Khaimin D.I. Formation of the estimated cost of a capital construction project using a digital information model. *Generation of the Future: Young Scientists' View – 2022 : collection of scientific articles of the 11th International Youth Scientific Conference*. 2022; 554-556. EDN MNHPKT. (rus.).

15. Zhdanova E.A. Formation of the estimated cost of a capital construction project using a digital information model. *Youth and systemic modernization of the country : collection of scientific articles of the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. 2022; 158-160. EDN AQMKKE. (rus.).

16. Kargin A.A., Khrustalev B.B., Glaskova S.Yu. Features of determining the estimated cost of an object when using information modeling technology. *Education and Science in the Modern World. Innovations*. 2021; 6(37):67-72. (rus.).

17. Malakhova V.V., Zamsha O.N. Analysis of domestic software complexes for assessing the cost of capital construction objects using TIM technologies. *Economics of Construction and Nature Management*. 2024; 2(91):84-93. EDN JWEOQX. (rus.).

18. Ignatyev A.V., Borkunov V.A., Ryabova E.A., Panov A.V., Ivanov V.V., Adamiya D.D. Development of a methodology for the formation of an estimate for a construction object based on its information model. *Engineering journal of Don*. 2021; 12(84):488-495. EDN EHIJLP. (rus.).

19. Borkunov V.A. Methodology of forming estimates of a construction object based on its information model. *European Science Forum : collection of articles*

of the VIII International scientific and practical conference. 2021; 42-46. EDN OVYQLW. (rus.).

20. Lavrenyak S.N. Integration of BIM models into estimating: more than just 3D. Creation of estimate documentation based on BIM is a real departure from routine and cost optimization. Practical cases and solutions. Digital VOR. *Nevsky Construction Forum*. 2024. (rus.).

21. Karakozova I.V. Foreign experience of definition of estimate expenses for building objects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 6:61-65. EDN OWFRSD. (rus.).

22. Franco J., Mahdi F., Abaza H. Using Building Information Modeling (BIM) for Estimating and Scheduling, Adoption Barriers. *Universal Journal of Management*. 2015; 3(9):376-384. DOI: 10.13189/ujm.2015.030905

23. Plebankiewicz E., Zima K., Skibniewski M. Analysis of the First Polish BIM-Based Cost Estimation Application. *Procedia Engineering*. 2015; 123:405-414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.064

24. Rahimi M.Z., Khan H. Building Information Model for Cost Estimation and Scheduling in Building Architecture. *Global Journal of Engineering Design & Technology*. 2024. DOI: 10.35248/2319-7293.24.13.202

Received March 14, 2025.

Adopted in revised form on May 4, 2025.

Approved for publication on May 5, 2025.

BIONOTES: **Elena V. Makisha** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 860246; MakishaEV@mgsu.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.777-784

Практическое применение дополненной реальности и технологий информационного моделирования в процессах капитального строительства

Василиса Васильевна Пащенко¹, Владислав Александрович Мурленко²,
Сергей Николаевич Гуреев², Виктор Сергеевич Евстратов³

¹ Газпром нефть информационно-технологический оператор (Газпром нефть ИТО);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Газпром нефть; г. Санкт-Петербург, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель настоящего исследования — проверить возможность использования программно-аппаратного решения, включающего применение алгоритмов искусственного интеллекта и технологий визуализации ТИМ-моделей в режимах дополненной (AR), смешанной (MR) и комбинированной (AMR) реальности в условиях капитального строительства, а также проверить гипотезу о том, что данное решение позволит повысить точность и оперативность контроля, улучшить управление процессами и сократить расходы за счет снижения числа переделок.

Материалы и методы. Испытания проводились сценарным методом, предусматривающим последовательное прохождение тестов, соответствующих реальным условиям использования: от подготовки площадки и проверки возможности сопоставления цифровой 3D-модели с физическим объектом до формирования итоговой отчетной документации.

Результаты. Проверены гипотеза о точности выявления геометрических несоответствий в оборудовании до его транспортировки на строительную площадку, стабильность работы платформы в условиях реального строительного контроля с применением технологии дополненной и смешанной реальности. Произведена оценка экономической и временной эффективности системы за счет автоматизации процессов обнаружения отклонений и формирования отчетности.

Выводы. Эксперименты продемонстрировали, что технология позволяет визуально совмещать ТИМ-модель и реальный объект, одновременно автоматизируя процесс фиксации отклонений и формируя отчеты, доступные для анализа как на площадке, так и в офисе. Подобная прозрачность и скорость обмена информацией дают возможность быстрее принимать решения и своевременно привлекать к устранению несоответствий всех заинтересованных специалистов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дополненная реальность, капитальное строительство, строительный контроль, технологии информационного моделирования, коллизия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пащенко В.В., Мурленко В.А., Гуреев С.Н., Евстратов В.С. Практическое применение дополненной реальности и технологий информационного моделирования в процессах капитального строительства // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 777–784. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.777-784

Автор, ответственный за переписку: Виктор Сергеевич Евстратов, EvstratovVS@mgsu.ru.

Practical application of augmented reality and information modelling technologies in capital construction processes

Vasilisa V. Pashchenkova¹, Vladislav A. Murlenko², Sergey N. Gureev²,
Victor S. Evstratov³

¹ Gazprom Neft Information Technology operator; St. Petersburg, Russian Federation;

² Gazprom Neft; St. Petersburg, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to test the possibility of using a hardware-software solution including the application of artificial intelligence algorithms and technologies for visualization of TIM models in the modes of augmented (AR), mixed (MR) and combined (AMR) reality in the conditions of capital construction, as well as to test the hypothesis that this solution will increase the accuracy and efficiency of control, improve process management and reduce costs by reducing the number of reworks.

Materials and methods. The tests were carried out by the scenario method, which provides for the consecutive passing of tests corresponding to the real conditions of use: from site preparation and checking the possibility of comparing the 3D digital model with the physical object to the formation of the final reporting documentation.

Results. The hypothesis about the accuracy of detection of geometrical discrepancies in the equipment before its transportation to the construction site, stability of the platform operation in the conditions of real construction control with the use of augmented and mixed reality technology were tested. The economic and time efficiency of the system due to automation of the processes of deviation detection and reporting has been evaluated.

Conclusions. The experiments demonstrated that the technology allows to visually combine the TIM-model and the real object, simultaneously automating the process of deviation detection and generating reports available for analysis both on the site and in the office. Such transparency and speed of information exchange enable faster decision-making and timely involvement of all interested specialists in the elimination of discrepancies.

KEYWORDS: augmented reality, capital construction, construction control, information modelling technologies, collision

FORCITATION: Pashchenkova V.V., Murlenko V.A., Gureev S.N., Evstratov V.S. Practical application of augmented reality and information modelling technologies in capital construction processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):777-784. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.777-784 (rus.).

Corresponding author: Victor S. Evstratov, EvstratovVS@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях капитального строительства одной из ключевых задач является обеспечение ранней поставки и монтажа оборудования длительного цикла изготовления [1]. Любое отклонение от технических условий или рабочей документации может привести к внеплановым корректировкам в полевых условиях, что негативно сказывается на сроках и качестве реализации проекта. Применение технологии дополненной/смешанной реальности (AR/MR) и технологий информационного моделирования (ТИМ) позволяет минимизировать влияние человеческого фактора за счет автоматизации анализа данных и наглядного представления проектных решений [2–4].

Технологии информационного моделирования служат основой для внедрения технологий дополненной реальности (AR/MR/AMR) в строительстве [5–9]. AR-технологии, в свою очередь, делают ТИМ-модели более адаптированными, наглядными и применимыми для оперативного принятия решений на строительной площадке [10–15]. Основные мировые тренды говорят о ежегодном увеличении объема рынка AR-технологий¹ [16–19].

Цель настоящего исследования — проверить возможность использования программно-аппаратного решения, включающего использование алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) и технологий визуализации ТИМ-моделей в режимах дополненной (AR), смешанной (MR) и комбинированной (AMR) реальностей в условиях капитального строительства, а также проверить гипотезу о том, что это решение позволит повысить точность и оперативность контроля, улучшить управление процессами и сократить расходы за счет снижения числа переделок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания проводились сценарным методом, предусматривающим последовательное прохожде-

ние тестов, соответствующих реальным условиям использования: от подготовки площадки и проверки возможности сопоставления цифровой 3D-модели с физическим объектом до формирования итоговой отчетной документации. В основу сценариев были положены характерные процессы, происходящие при поставке оборудования и строительстве объектов. Исследование выполнялось на площадке одного из промышленных объектов ГК ПАО «Газпром нефть» с подготовленным блочным оборудованием для испытаний.

Основные задачи в рамках исследования:

- проверка гипотезы о точности выявления геометрических несоответствий в оборудовании до его транспортировки на строительную площадку;
- проверка стабильности работы платформы в условиях реального строительного контроля с применением технологии дополненной и смешанной реальности;
- оценка экономической и временной эффективности системы за счет автоматизации процессов обнаружения отклонений и формирования отчетности.

При этом ключевыми метриками и проверками стали: работоспособность программного обеспечения (ПО) в режимах AR, MR и AMR при загрузке полной ТИМ-модели, работа устройства в автономном режиме (без сети интернет), корректность автоматизированного формирования отчетов, выявление расхождений между фактическим объектом и 3D-моделью с точностью до ± 15 мм и полнота обнаружения отклонений по сравнению со списком заранее известных несоответствий.

Для осуществления исследования использовалась площадка с подготовленным для испытаний блочным оборудованием и ТИМ-моделью объекта в форматах r3db и nwc. Эта модель включала архитектурные решения, оборудование и коммуникации, а также отображала плановое размещение всего комплекса относительно строительной сетки и привязку по высоте к отметкам балтийской системы координат. Была сформирована группа специалистов с необходимыми навыками в сфере строительного

¹ URL: <https://www.statista.com/outlook/amo/ar-vr/worldwide#revenue>

контроля и ТИМ-проектирования, которая обеспечивала корректность процедуры замеров и анализа данных.

В качестве аппаратных средств применялись тахеометр, лазерный дальномер Ada cosmo 70 и мобильный ТИМ-сканер, способный визуализировать объект в режимах AR, MR и AMR реальности. Программное обеспечение, установленное на ТИМ-сканере, позволяло загружать полные ТИМ-модели и управлять ими с помощью алгоритмов ИИ на архитектурах HITNet и YOLO для быстрой идентификации потенциальных отклонений. При этом учитывалась автономная работа комплекса без подключения к сети интернет, что обеспечивало независимость от внешней инфраструктуры.

Программа испытаний предусматривала выполнение серии тестов, соответствующих техническому заданию. К ним относились проверка корректности отображения всех разделов проекта (архитектура, конструкция, инженерные сети) в режиме визуализации, оценка возможности устройства функционировать без сетевого соединения, тестирование автоматической генерации отчетов по результатам анализа, а также измерение точности определения расхождений до ± 15 мм при сопоставлении реального оборудования с цифровой моделью. Для этого проводилась последовательность действий, начиная с загрузки полной модели и включения всех доступных разделов, после чего оператор производил наложение 3D-изображения на реальный объект. Затем в условиях отключенного интернета проверялась бесперебойность работы системы и способность корректно совмещать модель с физическими объектами. Чтобы удостовериться в правильности и полноте обнаружения коллизий, сравнивали реальные размеры и координаты, определенные тахеометром, с виртуальными значениями, полученными в процессе наложения. Выявленные несоответствия фиксировались при помощи фотофиксации и комментариев, после чего программа формировала итоговый отчет, доступный на устройстве и компьютере.

Методика испытаний организована таким образом, чтобы каждое требование, сформулированное в программе (оценка работоспособности ПО, автономной функциональности, точности выявления отклонений и полноты детекции), проверялось с применением четких критериев. С целью оценки интерфейса и скорости отклика использовалась балльная шкала, где пользователи фиксировали общее удобство работы и время реакции системы. Для подтверждения точности сопоставления реальных и проектных параметров осуществлялись геодезические измерения точек A_i и B_i , в результате которых вычислялись расстояния R_i . В цифровой среде аналогичные пары точек фиксировались как L_i . Далее определялось отклонение d_i , т.е. модуль разницы между R_i и L_i , а усредненное значе-

ние D указывало на общее расхождение. Испытания считались успешными, если максимальное отклонение d_i не превышало 15 мм и если среднее значение D оставалось в пределах 10 мм. Полнота обнаружения коллизий оценивалась путем сопоставления заранее известных несоответствий с теми, что были найдены системой: рассчитывался показатель K , отражающий отношение подтвержденных отклонений к их общему количеству, умноженное на десять. При достижении уровня $K \geq 8$ результат считался удовлетворительным.

Таким образом, примененная совокупность методов (геодезическое измерение, визуализация в AR/MR/AMR-режимах, балльная оценка интерфейса, анализ полноты обнаружения коллизий) и предоставленные материалы (ТИМ-модель, аппаратура для замеров и ПО) обеспечили всестороннюю проверку исследуемой технологии и позволили сделать выводы о ее эффективности и практической применимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе испытаний оценивались несколько ключевых параметров, связанных с точностью, удобством и полнотой обнаружения коллизий. Каждый из проведенных тестов приурочен к определенному сценарию, отражающему возможные условия эксплуатации на реальных строительных площадках. Ниже последовательно представлены полученные результаты с указанием соответствующих таблиц.

На первом этапе проверялась работоспособность ПО в режимах AR, MR и AMR при одновременной загрузке полной ТИМ-модели, включающей все основные разделы проекта (архитектурные, инженерные, конструктивные). Оценка проводилась по трем критериям: возможность просмотра всей модели, скорость отклика интерфейса и субъективная оценка удобства использования. Каждый критерий оценивался по балльной шкале, а итоговый показатель определялся путем усреднения (табл. 1).

Несмотря на то, что система корректно отображала всю модель, у участников эксперимента возникли задержки при быстром переключении между обширными разделами, поэтому окончательная итоговая оценка составила 7,6 баллов. Это считается удовлетворительным результатом, позволяющим использовать программно-аппаратный комплекс (ПАК) в реальных условиях.

Во втором тесте проверялась работа устройства в автономном режиме без подключения к интернету. Для этого ПАК перезагружался с отключенной сетью, затем осуществлялось совмещение ТИМ-модели с реальным объектом. Критерием успешности являлась возможность корректной привязки цифровой модели к физическому окружению. Тест завершился положительно, комплекс не потерял основные функции.

Табл. 1. Итоговая оценка программного обеспечения при загрузке полной ТИМ-модели

Table 1. Final software evaluation when loading the full TIM model

Оцениваемый параметр Estimated parameter	Критерий оценки Evaluation criterion	Шкала оценки / Rating scale	Оценка, баллы Score, points
Возможность просмотра всей модели / Ability to view the entire model	Возможно/невозможно Possible/impossible	Возможно — 10 баллов, невозможно — 0 баллов Possible — 10 points, impossible — 0 points	5
Скорость отклика интерфейса Interface response speed	Время реакции ПО Response time of the software	>10 с — 0 баллов, >1 с — 5, <1 с — 10 >10 s — 0 points, >1 s — 5, <1 s — 10	10
Возможность использования ПАК / Ability to use the PAC	Субъективная оценка Subjective assessment	0–10 (шаг 1 балл) / 0–10 (step 1 point)	8
Средний балл / Average score	–	Усреднение по трем критериям Averaging by three criteria	7,6

На третьем этапе проверялась корректность формирования автоматизированных отчетов по результатам визуализации и анализа. Во время осмотра оборудования оператор добавлял в систему фотографии, текстовые комментарии и пометки на элементе модели, после чего формировался общий отчет, доступный как на устройстве, так и на персональном компьютере. Согласно итоговой проверке, отчет содержал все внесенные данные и корректно воспроизводился на разных устройствах.

Следующий этап — обнаружение отклонений между 3D-моделью и фактическим состоянием объекта. Определялось, насколько система способна

выявлять расхождения в пределах ± 15 мм. Для этого геодезистами выбирались характерные точки A_i и B_i на блочном оборудовании, выполнялись контрольные замеры с помощью тахеометра R_i , а затем оператор в цифровой среде фиксировал расстояния L_i . В результате по каждой паре точек вычислялась величина $d_i = |R_i - L_i|$. В качестве иллюстрации приведены усредненные данные пяти повторных измерений (табл. 2), где собраны ключевые пары точек с наибольшим влиянием на общий итог.

Как видно из табл. 2, среднее отклонение D составило 24 мм, что превышает установленный допуск ± 15 мм. Максимальное расхождение 71 мм

Табл. 2. Сравнение расстояний, полученных при геодезической съемке и с помощью ПАК

Table 2. Comparison of distances obtained by geodetic survey and by PAC

Замеряемые точки Measured points	Расстояние по геодезической съемке R_i , мм Geodetic survey distance R_i , mm	Расстояние по ПАК L_i , мм PAC distance L_i , mm	Отклонение d_i , мм Deviation d_i , mm
1–2	6062	5991,2	70,8
2–3 (разница высот) 2–3 (height difference)	2465	2425	40
1–4 (разница высот) 1–4 (height difference)	98	106,6	–8,6
1–5 (разница высот) 1–5 (height difference)	365	382	–17
1–6 (разница высот) 1–6 (height difference)	741	744	–3
1–7 (разница высот) 1–7 (height difference)	1322	1316,4	5,6

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Замеряемые точки Measured points	Расстояние по геодезической съемке R_i , мм Geodetic survey distance R_i , mm	Расстояние по ПАК L_i , мм PAC distance L_i , mm	Отклонение d_p , мм Deviation d_p , mm
Среднее отклонение D Mean deviation D	–	–	24
Максимальное отклонение Maximum deviation	–	–	71

выявлено по паре точек 1–2 и значительно превосходит требуемое значение. Тем не менее повторяемость измерений оказалась высокой, система выявляла основные, наиболее крупные несоответствия геометрии, что важно для раннего контроля. Для задач высокой точности без дополнительных доработок комплекс не подходит.

Дополнительно анализировалась полнота обнаружения отклонений. В эксперименте присутствовал список заранее известных коллизий, составляющих d_k . Система нашла общее количество отклонений d_f . Поскольку ложных срабатываний не выявили ($d_n = 0$), полученное соотношение $K = (d_f - d_n) / d_k \cdot 10$ достигло верхнего значения 10, что соответствует высокому уровню детекции. Те же несоответствия, которые возникли из-за расхождения между проектной документацией и реальными узлами, были корректно зафиксированы и подтверждены по факту осмотра.

Во время испытаний также установлено, что при возвращении к исходной метке после обхода объекта с разных сторон периодически происходила потеря позиционирования, что связано с недостаточным количеством опорных точек. Также обнаружено несоответствие загруженной в ПАК 3D-модели и рабочей документации, что ограничивает возможности автоматического обнаружения коллизий и повышает риск пропуска важных деталей, поэтому перед использованием системы необходимо своевременно актуализировать цифровые модели. Дополнительно зафиксирована потеря позиционирования при появлении движущихся объектов (техника, люди) в зоне прямой видимости между комплексом и обследуемым оборудованием, указывающая на необходимость совершенствования алгоритмов слежения. Также оператору нередко приходится перемещаться назад с удержанием фокуса на объекте обследования, что создает риск столкновений и травм в динамичной среде строительной площадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты продемонстрировали, что технология позволяет визуально совмещать ТИМ-модель и реальный объект, одновременно автоматизируя процесс фиксации отклонений и формируя отчеты, доступные для анализа как на площадке, так и в офисе. Подобная прозрачность и скорость обмена информацией дает возможность быстрее принимать решения и своевременно привлекать к устранению несоответствий всех заинтересованных специалистов.

Несмотря на то, что выявлено превышение допустимого предела точности (максимальное отклонение достигло 71 мм при требуемых ± 15 мм), практика показала высокую повторяемость измерений. Это свидетельствует о перспективности развития алгоритмов позиционирования, которые при дополнительной калибровке способны приблизить результаты к требуемой точности. Кроме того, единообразная и подробная отчетность, формируемая в ходе осмотра, дает возможность не только фиксировать все несоответствия, но и аккумулировать информацию, необходимую для дальнейшего анализа и корректировки проектной документации.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о возможной применимости технологии не только для монтажа блочно-модульного оборудования, но и для других сценариев капитального строительства. Желательна дополнительная проверка применимости при реконструкции действующих производств для оперативной сверки проектных решений с фактическими условиями, в контрольных процедурах ввода объектов в эксплуатацию, когда требуется быстрое и точное выявление несоответствий инженерных систем, а также в процессе мониторинга крупногабаритных элементов на складских площадках, где важно раннее обнаружение дефектов и отклонений от проектных координат.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Изотова О.* Требования к строительству объектов капитального строительства // Сметно-договорная работа в строительстве. 2020. № 9. С. 68–72. EDN OAUUVF.
2. *Zheleznov M.* A lifecycle management system for capital construction facilities based on a digital cloud platform implementing information modeling methods and technologies // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281. P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202128104007. EDN ZBNTPY.
3. *Евтушенко С.И., Куценко М.Д.* Использование технологии дополненной реальности на этапах жизненного цикла объекта капитального строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1813–1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820. EDN IOBIMY.
4. *Александрин А.В.* Использование информационных технологий на этапе строительства объекта // Строительство и реконструкция. 2023. № 4 (108). С. 132–137. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-108-4-132-137. EDN BVHWWU.
5. *Адамцевич Л.А., Воробьев П.Ю., Железнов Е.М.* Технология мониторинга объектов капитального строительства на этапах жизненного цикла методами дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов) на основе высокоточной цифровой модели объекта // Строительство и архитектура. 2021. Т. 9. № 3. С. 51–55. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-51-55. EDN YSZJCM.
6. *Адамцевич Л.А., Харисов И.З.* Обзор технологий Индустрии 4.0 для разработки системы дистанционного управления строительной площадкой // Строительство и архитектура. 2021. Т. 9. № 4. С. 91–95. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-4-91-95. EDN RLENTY.
7. *Адамцевич Л.А., Харисов И.З., Камаева Ю.В.* Международный опыт применения технологий Индустрии 4.0 для мониторинга актуального состояния строительного производства // Строительное производство. 2022. № 3. С. 58–66. DOI: 10.54950/26585340_2022_3_58. EDN EUJSKM.
8. *Адамцевич Л.А., Сорокин И.В., Настычук А.В.* Перспективные в условиях цифровой трансформации строительной отрасли технологии индустрии 4.0 // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 4. С. 101–105. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-101-105. EDN GGNGAU.
9. *Адамцевич Л.А., Камаева Ю.В.* Использование VR, AR, MR-технологий в строительстве на этапах жизненного цикла объектов капитального строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022 : сб. докл. Третьей национальной науч. конф. 2023. С. 800–804. EDN HBUDKK.
10. *Пименов С.И., Коклюгина Л.А.* Строительная информационная модель как инструмент снижения информационной неопределенности в оперативном управлении строительства // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14. № 2. С. 116–127. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.09. EDN OLAZTN.
11. *Рудь А.В., Буквина Е.А., Буквина М.А., Панченко А.Ю., Фалеева Е.В.* Использование технологий виртуальной и дополненной реальности при проектировании и строительстве инфраструктурных объектов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2021. № 9. С. 104–107. EDN TMISSY.
12. *Бондаренко А.В., Преображенский А.П.* Исследование возможностей применения технологий виртуальной и дополненной реальности в строительной сфере // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2023. № 1 (44). С. 47–51. EDN HEZTQO.
13. *Разянов Р.В.* AR технологии в строительном производстве // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 4. С. 19–27. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-4-19-27. EDN SPKNAF.
14. *Girgin S., Fruchter R., Fischer M.* A case study towards assessing the impact of mixed reality-based inspection and resolution of MEP issues during construction // Journal of Information Technology in Construction. 2025. Vol. 30. Pp. 461–476. DOI: 10.36680/j.itcon.2025.020
15. *Ghani B.A.* Augmented Reality in Construction: Enhancing Efficiency and Collaboration // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2025. Vol. 11. Issue 2. Pp. 1836–1844. DOI: 10.32628/cseit23112550
16. *Yigitbas E., Nowosad A., Engels G.* Supporting Construction and Architectural Visualization through BIM and AR/VR : a Systematic Literature Review // ArXiv. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.12274
17. *Monla Z., Assila A., Beladjine D., Zghal M.* Maturity Evaluation Methods for BIM-Based AR/VR in Construction Industry : a Literature Review // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 101134–101154. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3281265
18. *Schiavi B., Havard V., Beddiar K., Baudry D.* BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction // Automation in Construction. 2022. Vol. 134. P. 104054. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104054
19. *Ma S.* Research on construction management based on BIM-AR/VR technology // E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 606. P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202560604007

Поступила в редакцию 23 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

Об авторах: **Василиса Васильевна Пашенкова** — ведущий аналитик бизнес-процессов; **Газпром нефть информационно-технологический оператор (Газпром нефть ИТО)**; 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 60/129, лит. А; Pashchenkova.VV@gazprom-neft.ru;

Владислав Александрович Мурленко — старший менеджер программы по развитию и инновациям в капитальном строительстве; **Газпром нефть**; 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Почтамтская, д. 3–5; Murlenko.VA@gazprom-neft.ru;

Сергей Николаевич Гуреев — начальник управления; **Газпром нефть**; 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Почтамтская, д. 3–5; GUREEV.SN@gazprom-neft.ru;

Виктор Сергеевич Евстратов — преподаватель; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4837-7695, РИНЦ ID: 895643, Scopus: 57197806238, ORCID: 0000-0002-7794-3897; EvstratovVS@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Izotova O. Requirements for the construction of capital construction projects. *Estimate and Contractual Work in Construction*. 2020; 9:68-72. EDN OAUUVF. (rus.).
2. Zheleznov M. A lifecycle management system for capital construction facilities based on a digital cloud platform implementing information modeling methods and technologies. *E3S Web of Conferences*. 2021; 281:04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202128104007. EDN ZBNTPY.
3. Evtushenko S.I., Kuzenko M.D. Use of augmented reality technology at the stages of the life cycle of a capital construction facility. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1813-1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820. EDN IOBIMY. (rus.).
4. Aleksanin A.V. Use of information technologies at the facility construction stage. *Building and Reconstruction*. 2023; 4(108):132-137. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-108-4-132-137. EDN BVHWWU. (rus.).
5. Adamcevich L., Vorob'ev P., Zheleznov E. Technology for monitoring capital construction objects at the life cycle stages by remote sensing methods using unmanned aircraft (drones) based on high precision digital model. *Construction and Architecture*. 2021; 9(3):51-55. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-51-55. EDN YSJZCM. (rus.).
6. Adamcevich L., Harisov I. An overview of industry 4.0 technologies for the development of a remote-control system for a construction site. *Construction and Architecture*. 2021; 9(4):91-95. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-4-91-95. EDN RLENTY. (rus.).
7. Adamtsevich L.A., Kharisov I.Z., Kamaeva Yu.V. International experience in applying industry 4.0 technologies for construction progress monitoring. *Construction Production*. 2022; 3:58-66. DOI: 10.54950/26585340_2022_3_58. EDN EUJSKM. (rus.).
8. Adamcevich L., Sorokin I., Nastychuk A.I. Promising industry 4.0 technologies in the context of the construction industry digital transformation. *Construction and Architecture*. 2022; 10(4):101-105. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-101-105. EDN GGNGAU. (rus.).
9. Adamtsevich L.A., Kamaeva Yu.V. Use of VR, AR, MR technologies in construction at the stages of the life cycle of capital construction projects. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 800-804. EDN HBUDKK. (rus.).
10. Pimenov S.I., Kokliugina L.A. Construction information model as a tool to reduce information uncertainty in the operational management of construction. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(2):116-127. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.09. EDN OLAZTN. (rus.).
11. Rud A.V., Bukvina E.A., Bukvina M.A., Panchenko A.Y., Faleeva E.V. The use of virtual and augmented reality technologies in the design and construction of infrastructural objects. *Design of the Development of the Regional Railway Network*. 2021; 9:104-107. EDN TMISSY. (rus.).
12. Bondarenko A.V., Preobrazhenskiy A.P. The application study augmented reality technologies in the construction industry. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2023; 1(44):47-51. EDN HEZTQO. (rus.).
13. Raziapov R.V. Application of augmented reality methods in construction. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2021; 4:19-27. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-4-19-27. EDN SPKNAF. (rus.).
14. Girgin S., Fruchter R., Fischer M. A case study towards assessing the impact of mixed reality-based inspection and resolution of MEP issues during construction. *Journal of Information Technology in Construction*. 2025; 30:461476. DOI: 10.36680/j.itcon.2025.020
15. Ghani B.A. Augmented Reality in Construction: Enhancing Efficiency and Collaboration. *Internationa*

tional Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2025; 11(2):1836-1844. DOI: 10.32628/cseit23112550

16. Yigitbas E., Nowosad A., Engels G. Supporting Construction and Architectural Visualization through BIM and AR/VR : a Systematic Literature Review. *ArXiv*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.12274

17. Monla Z., Assila A., Beladjine D., Zghal M. Maturity Evaluation Methods for BIM-Based AR/VR in Construction Industry : a Literature Review. *IEEE Ac-*

cess. 2023; 11:101134-101154. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3281265

18. Schiavi B., Havard V., Beddiar K., Baudry D. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction. *Automation in Construction*. 2022; 134:104054. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104054

19. Ma S. Research on construction management based on BIM-AR/VR technology. *E3S Web of Conferences*. 2025; 606:04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202560604007

Received December 23, 2024.

Adopted in revised form on February 10, 2025.

Approved for publication on February 13, 2025.

B I O N O T E S : **Vasilisa V. Pashchenkova** — leading business process analyst; **Gazprom Neft Information Technology operator**; 60/129, lit. A Moskovsky ave., St. Petersburg, 190013, Russian Federation; Pashchenkova.VV@gazprom-neft.ru;

Vladislav A. Murlenko — senior program manager for development and innovation in capital construction; **Gazprom Neft**; 3–5 Pochtamskaya St., St. Petersburg, 190000, Russian Federation; Murlenko.VA@gazprom-neft.ru;

Sergey N. Gureev — head of the department; **Gazprom Neft**; 3–5 Pochtamskaya St., St. Petersburg, 190000, Russian Federation; GUREEV.SN@gazprom-neft.ru;

Victor S. Evstratov — lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4837-7695, ID RSCI: 895643, Scopus: 57197806238, ORCID: 0000-0002-7794-3897; EvstratovVS@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

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

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

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 источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

