

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 6/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 6
2020**

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

Сквозной номер 141

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 6
2020**

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 публикация, распространение результатов российских и зарубежных научных исследований для обеспечения широкого обмена научной информацией, формирования открытого информационного кластера в области строительной науки и образования, повышения международного авторитета российской строительной науки.

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, корп. 8. Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Тел.:	(499) 188-29-75
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	29.06.2020.
Подписан в свет	30.06.2020.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,44. Тираж 100 экз. Заказ № 91

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, президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Евгений Валерьевич Королев, д-р техн. наук, проф., зам. директора НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы», 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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Дмитрий Николаевич Силка, д-р экон. наук, доц., зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Зав. редакцией

Анна Александровна Дядичева

Дизайн и верстка

Федотов Александр Дмитриевич

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык

Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор

Любовь Владимировна Светличная

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

Редакционный совет

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

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

Николай Владимирович Баничук, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация

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

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

Андрей Анатольевич Волков, председатель, член-корр., член президиума Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

Георгий Васильевич Есаулов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., проректор по научной работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.06.2020

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

Evgeniy V. Korolev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Editorial Board

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

Rolf Katzenbach, Doctor of Engineering, Professor, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation
Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Roode Liias, PhD, Professor (construction economics and management) Tallin University of Technology, Estonia

Dmitry N. Silka, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Managing editor

Anna A. Dyadicheva

Editors

Tat'yana V. Berdnikova

Corrector

Lyubov' V. Svetlichnaya

Layout

Aleksandr D. Fedotov

Russian-English translation

Ol'ga V. Yudenkova

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

Georgi V. Esaulov, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

Andrei A. Morozenko, 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

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

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

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

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

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

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

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

Andrey A. Volkov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Е.Ю. Стрельникова, И.С. Труфляк

Отличительные черты архитектуры первых образовательных учреждений Европы для детей с ментальными нарушениями	766
---	------------

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

В.Г. Офрихтер, Г.М. Батракова, Н.Н. Слюсарь

Моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых коммунальных отходов	776
--	------------

В.С. Уткин, С.А. Соловьев

Разработка усовершенствованных моделей для расчета свай на несущую способность, осадку и надежность	789
--	------------

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Л.Н. Талипов, Е.Г. Величко, В.С. Семенов

Исследование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости бетона	824
--	------------

Е.В. Королев, Тхань Куй Зыонг, А.С. Иноземцев

Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати	834
---	------------

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.И. Иваненко, А.М. Новикова

Методы интенсификации биологической очистки с целью удаления тяжелых металлов	847
--	------------

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.В. Кловский, Д.В. Козлов

Скоростной режим винтовых течений в створе косонаправленных донных циркуляционных порогов	859
--	------------

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Волкодав, И.А. Волкодав

Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий.	867
---	------------

Е.М. Попова, И.С. Птухина, А.Е. Радаев

Методика обоснования организационно-технологических характеристик комплекса объектов строительства на основе дробно-линейного программирования.	907
--	------------

Требования к оформлению научной статьи	939
---	------------

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Elena Yu. Strelnikova, Irina S. Truflyak

Distinctive architectural features of the first european educational institutions for children with mental disabilities.	766
---	------------

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

Vadim G. Ofrikhter, Galina M. Batrakova, Natalia N. Sliusar

Modeling the stress-strain state of of a municipal solid waste landfill	776
--	------------

Vladimir S. Utkin, Sergey A. Solovyev

Development of improved models for pile load bearing capacity, settlement and reliability analysis	789
---	------------

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Linar N. Talipov, Evgeny G. Velichko, Vyacheslav S. Semenov

Study of synergetic effect of the complex polycarboxylate anti-corrosion additive in the model of pore concrete fluid	824
--	------------

Evgenij V. Korolev, Thanh Qui Duong, Aleksandr S. Inozemtcev

Method of internal care of cement hydration in 3D printing formulations	834
--	------------

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Irina I. Ivanenko, Antonina M. Novikova

Methods of biological treatment intensification aimed at removal of heavy metals	847
---	------------

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Alexey V. Klovisky, Dmitry V. Kozlov

Velocity rate of screw streams in the site of submerged vanes.	859
---	------------

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

Vladimir A. Volkodav, Ivan A. Volkodav

Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies.	867
---	------------

Ekaterina M. Popova, Irina S. Ptukhina, Anton E. Radaev

Method of substantiation of organizational and processing characteristics of the complex of construction sites based on linear fractional programming	907
--	------------

Requirements for research paper design	939
---	------------

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 725:616.89-008.454-053.2-081.23(4)

DOI:10.22227/1997-0935.2020.6.766-775

Отличительные черты архитектуры первых образовательных учреждений Европы для детей с ментальными нарушениями

Е.Ю. Стрельникова¹, И.С. Труфляк²

¹ Архитектурная мастерская ИП «Щербинина Ю.Д.»; г. Краснодар, Россия;

² Кубанский государственный аграрный университет (КубГАУ); г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обучению детей с ментальными нарушениями в нашей стране уделяется сегодня большое внимание. Проводятся исследования, вводятся новые стандарты и программы. Однако само здание школы к приему детей с психическими отклонениями не готово: в нормативной базе отсутствуют требования для строящихся зданий, а в построенных не предусмотрены свободные помещения, которые возможно использовать в образовательном процессе детей с умственной отсталостью (УО). Для формирования качественной внутренней и внешней архитектурной среды современных школ, учитывающих возможность обучения различных категорий школьников, важно изучить мировой опыт.

Материалы и методы. Изучены исторические материалы, хранящиеся в фондах российских и зарубежных библиотек. Применены методы теоретического изучения, систематизации, анализа полученных данных и выявления практически ценной информации.

Результаты. Проанализирована информация о первых школах для детей с УО. Они появились в передовых странах Европы в середине XIX в. Сочетание развития психологии, медицины, педагогики и яркие социальные явления привели к организации учреждений, в которых не только обеспечивали уход за детьми с УО, но и поняли, что их можно и нужно обучать. Систематизация и анализ объемно-планировочных решений первых школ показали, что уже в тот период были определены правильные функциональные связи, номенклатура помещений, соединение эргономики помещений и возможностей детского организма с нарушениями развития.

Выводы. В начале процесса организации школ для детей с УО специальные объемно-планировочные решения для них не разрабатывали. Данные учреждения располагались часто в существующих и не приспособленных для новой функции зданиях. В планировочной структуре выявлены положительные и отрицательные черты. Исследование подтверждает, что сочетание многих факторов в середине XIX в. позволило начать формировать систему обучения детей с УО.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура школ лечебно-образовательные учреждения, реабилитационные учреждения, инклюзивная архитектура, европейские школы, дети с умственной отсталостью

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стрельникова Е.Ю., Труфляк И.С. Отличительные черты архитектуры первых образовательных учреждений Европы для детей с ментальными нарушениями // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 766–775. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.766-775

Distinctive architectural features of the first european educational institutions for children with mental disabilities

Elena Yu. Strelnikova¹, Irina S. Truflyak²

¹ Architectural workshop of IP "Shcherbinina Yu.D."; Krasnodar, Russian Federation;

² Kuban State Agrarian University (Kuban SAU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At present, considerable attention in our country is paid to training children with mental disabilities (MD). The relevant studies are conducted as well as new standards and programs are implemented. However, the school building itself is not suitable for the admission of children with mental disabilities: the regulatory system does not provide for any requirements with respect to the buildings under construction, and there are no vacant premises intended for children with mental disabilities that can be used in the educational process. To create the quality internal and external architectural environment at modern schools with due regard to training of various categories of schoolchildren, it is essential to review international practices.

Materials and methods. The historical records stored in the funds of Russian and foreign libraries have been studied. Methods of theoretical studies, systematization and the analysis of the received data have been used to search for practically relevant information.

Results. The information on the first schools for children with MD was analyzed. Such schools were established in the middle of XIX century in the leading European countries. Progress in psychology, medicine, pedagogy along with outstanding

social phenomena resulted in the foundation of institutions providing care for children with MD, as well as realization of the necessity and significance of their training. The systematization and analysis of space planning solutions of the first schools have shown that the appropriate function relations, the nomenclature of premises, due regard of premises ergonomics and abilities of children with MD were implemented even in that period.

Conclusions. At the initial stage of establishment of schools for children with MD, specific space planning solutions were not developed with respect to such schools. These institutions were often located in the existing buildings and were not adapted to perform new functions. The space planning structure had both strengths and weaknesses. This study confirms that a variety of factors allowed establishing the training system for children with MD in the middle of the XIX century.

KEYWORDS: school architecture, medical and educational institutions, rehabilitation facilities, inclusive architecture, European schools, children with mental disabilities

FOR CITATION: Strelnikova E.Yu., Truflyak I.S. Distinctive architectural features of the first european educational institutions for children with mental disabilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):766-775. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.766-775 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день накоплен большой опыт проектирования разнообразных пространств для воспитания, обучения, лечения детей с умственной отсталостью (УО). Их образованию в СССР практически не уделялось внимания, в соответствии с видом инвалидности, детей помещали в закрытые спецшколы [1]. Подобная сегрегация пагубно влияла как на самих воспитанников, так и на жизнь их семьи и всего общества. Сегодня на законодательном уровне закреплено право детей-инвалидов с ментальными расстройствами получать образование в среде школьников без особенностей развития — инклюзивное образование. Но к таким проектам оказались не готовы ни педагогический состав, ни общество, ни архитектурная среда. Чтобы иметь возможность грамотно создать школьное пространство, позволяющее детям с разными способностями чувствовать себя в нем комфортно и успешно получать новые знания, стоит задача изучить опыт предыдущих поколений, найти взаимосвязи с сегодняшним днем и определить положительные и отрицательные стороны данного вопроса. В результате будут выявлены закономерности в объемно-планировочных решениях первых образовательных учреждений для детей с ментальными нарушениями, что может быть использовано при создании нормативной базы проектирования инклюзивных школ [2, 3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа подготовлена на основе теоретического изучения различных источников, описывающих первый опыт европейских стран в области организации вспомогательного образования. Проанализированы труды российских и иностранных авторов, имевших непосредственное отношение к данному процессу — заведующих учебными заведениями, олигофренопедагогов, врачей, психологов. Эти исторические работы хранятся как в российских, так и в зарубежных фондах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вспомогательное обучение в странах Европы середины XIX в. представляло собой структуру, на-

правленную на образование детей, которые ни при каких условиях не справлялись с программой обычной школы, но не имели тяжелых поражений головного мозга. Наряду с этим создавались первые специализированные школы для детей с тяжелыми формами УО [4]. Вопросы создания таких учреждений и образовательного процесса в них описаны в научных источниках их организаторами, а также изучены первыми русскими олигофренопедагогами, врачами, психиатрами, педагогами и другими заинтересованными лицами. Они приезжали в города Европы и посещали школы, присутствовали на уроках, общались с персоналом и воспитанниками. И они стояли у истоков создания подобных учреждений в России: Е.К. Грачева, Н.П. Постовский, М.П. Постовская, Е.А. Бергман, П.Б. Никитин. В начале XX в. они перевели на русский язык иностранные пособия и научные материалы о воспитании, обучении и организации школ для детей с УО. Литературные труды этих авторов и переведенные ими можно считать первоисточниками для изучения данной темы.

Пионером в организации вспомогательных школ (Hilfsschulen), как указывается, в том числе, в книге Н.П. Постовского «Вспомогательные школы за границей» [5, с. 8], являлась с середины XIX в. Германия. Впоследствии представители разных стран посещали первые немецкие учреждения и использовали их опыт для развития такого обучения у себя на родине. Первый класс для детей с УО был создан в Германии в г. Цайц в 1803 г., но на постоянной основе они появились лишь в середине XIX в. В этот период социальные, политические и иные изменения в жизни европейского общества привели к введению обязательного образования для народных масс. Детей начали обучать, к чему ни здания школ, ни вся система не были готовы. В классах зачастую насчитывалось 70–80 учеников [6]. Несмотря на отсутствие индивидуального подхода, быстро стали выделяться те, кто не справлялся со школьной программой. В начале предполагалось, что отстающим требуются лишь дополнительные часы обучения, отдельного от обычных сверстников. На этой основе сформировали вспомогательные классы: часть уроков все ученики имели общие,

а на основные (сложные) — малоспособным выделялись дополнительные часы от 2-х до 12-ти в неделю (на сегодняшний день эта система «проросла» в так называемые ресурсные классы и инклюзию) [1, с. 15]. После преодоления отставания учащихся планировался их возврат в обычный класс. По такой схеме работали первые классы дополнительного обучения: в г. Галле в 1859 г., в г. Хемнице в 1860 г., в г. Дрездене в 1867 г., в г. Гера в 1874 г., в г. Апольда в 1877 г. [5, с. 9]. К сожалению, после восстановления в среде обычной школы и сверстников неуспевающие дети снова быстро показывали плохие результаты, которые улучшить было намного сложнее, чем впервые появившиеся. Таким образом, определялись те, которым требовались специальные методики и средства для качественного овладения материалом. Этим ознаменовался второй этап организации вспомогательного обучения.

К.В. Зегерт и К. Керн, пришедшие в олигофренопедагогику из сурдопедагогики, придерживались мнения, что «школьное обучение должно быть неотъемлемым элементом системы работы специальных учреждений для умственно отсталых детей» [7, с. 50]. К. Керн, получив большой опыт в образовании глухонемых детей, в ходе своей работы выделил среди них умственно отсталых. Он был убежден, что этих ребят требуется разделить для получения максимальных результатов. В 1859 г. он открыл собственное образовательное учреждение в г. Моккерн, где воплощал идеи и наработки. Оно стало научно-практическим институтом, состоящим из опытного, воспитательного, учебного отделений (школа-интернат) и убежища для взрослых с отсталостью [7, с. 51]. В 1863 г. Карл Керн предложил в Лейпцигском педагогическом обществе организовать школы для отсталых детей (Bewahranstalt).

Генрих Эрнст Штецнер (Stötzner), аналогично К. Керну, в своей работе «О школах для отсталых детей. Первый проект их устройства» (1864 г.) обосновывал необходимость отделения отстающих от основной успевающей массы школьников, подчеркивая, что отсутствие должного образования их ведет в будущем к наличию в обществе легкоуправляемых антисоциальных масс. Г. Штецнер рекомендовал создавать классы в подобных школах на 10–15 учащихся, предусматривать возможность оставлять ребят из неблагополучных семей в группах продленного дня и кормить сытным обедом. Благодаря активной работе Г.Э. Штецнера в Ганновере открыли Общество содействия воспитанию слабоумных детей, и идеи поддержки их образования стали продвигаться в массы. Организовывали первые вспомогательные классы при начальной школе, которые затем преобразовывались в самостоятельные школы. Большинство из них были бесплатными.

С каждым годом количество вспомогательных классов, школ и городов Германии, в которых они находились, росло. В табл. 1 отражен неуклонный

и быстрый рост количества городов и учащихся вспомогательных школ: за 20 лет количество городов возросло почти в 10 раз, а количество учеников — в 20.

Табл. 1. Количество городов Германии, обеспеченных вспомогательными школами, и учащихся в них [8, с. 15; 9, с. 23; 10, с. 100]

Table 1. Number of German cities locating schools for children with mental disabilities and quantity of students in them [8, p. 15; 9, p. 23; 10, p. 100]

Учебный год / Academic year	Количество городов, шт. / Number of cities, pcs.	Количество учащихся, чел. / Number of students, people
1893	32	2290
1900	90	8000
1902–1903	139	12 000
1904	143	15 000
1905	180	
1907	205	21 510
1908	220	23 000
1911	275	35 000
1913		43 000

Открытие первого подобного заведения в Берлине относится лишь к 1881 г. К 1913 г. в Германии вспомогательные школы были более чем в 250 городах с общим количеством учеников 43 000 [11].

По данным старшего ординатора П.Б. Никитина [12], немецкие педагоги предъявляли к зданиям школ для отсталых детей достаточно высокие требования. Вспомогательные классы открывали в рабочих районах при обычных школах (Volksschulen) (1–2 на округ), стараясь равномерно их распределять по школам населенного пункта, чтобы сократить расстояние школьникам до места проживания. Для занятий вспомогательной школы выделялись свободные кабинеты. Таким образом, обучение являлось инклюзивным (т.е. дети с отклонениями в развитии постоянно находились в группе с обычными сверстниками). Общий двор, гимнастический зал и другие помещения ежедневно сталкивали ребят между собой. Как отмечает П.Б. Никитин, это обстоятельство вызывало вражду и неблагоприятно сказывалось на учениках. Оно же стало мотивацией для обособления образования, как наиболее качественного, для детей с УО.

По количеству учеников классы вспомогательной школы разделялись на: низшей ступени — 15 человек, средние — 20, высшие — не более 20–25 [13, с. 35] с совместным обучением мальчиков и девочек. Дети распределялись в них в соответствии с интеллектуальными возможностями. Если канди-

датов было больше, чем мог вместить один класс, то открывался параллельный той же ступени.

Перечень изучаемых предметов во вспомогательных школах Германии был достаточно обширным. Например, в Галльской школе изучали Закон Божий, немецкий (родной) язык, арифметику, письмо, рисование, историю, географию, естествознание, пение, гимнастику; было также наглядное обучение и ручные работы. Особое место отводилось овладению ремеслами: переплетное дело, столярное, токарное, плотничье, слесарное, разнообразное шитье, плетение, вышивка, кройка. Ремесло выбиралось для каждого в соответствии с индивидуальным развитием и навыками. Такое разнообразное среднетехническое образование, полученное отсталым ребенком в школе, давало возможность при вступлении во взрослую жизнь обеспечивать себя материально самостоятельно.

В статье из журнала «Русская школа» 1911 г. упоминается о важности физического воспитания во вспомогательных школах. Автор обращает внимание на имеющийся положительный опыт его зарубежных коллег: «устранение тех или иных болезненных проявлений со стороны носа или зрения, дефектов, довольно часто встречающихся у воспитанников вспомогательных школ, производит значительный поворот к лучшему в умственном развитии ученика» [13, с. 32]. Если учреждение располагалось в окружении природы, то занятия старались проводить на открытом воздухе.

К началу XX в. в некоторых городах Германии стали организовывать послешкольную образовательную ступень для ребят с отсталостью [14, с. 40]. Она представляла собой «дальнейшие вспомогательные школы» (Fortbildungshilfschule), в которых обучались различным ремеслам, в соответствии с уровнем физических и ментальных возможностей учащихся: плетение из соломы, плетение корзин; переплетное, токарное, столярное, сапожное дело; огородничество. Проведенные исследования доказывали, что создание подобных учреждений было эффективно — 80 % выпускников имели самостоятельный доход.

Е.К. Грачева была активным деятелем в России в области образования детей с отсталостью. Совершив поездку по европейским странам, она в 1909 г. написала книгу «Приюты-школы для детей идиотов и эпилептиков в Швеции, Франции и Германии» [14], в которой описываются подобные учреждения не только в дефектологическом и педагогическом разрезе, но и в разрезе обустройства и архитектурных черт самих зданий.

В Вильгельмсштифте в школах-приютах для душевнобольных, эпилептиков, идиотов в Потсдаме (Германия), как отмечает Е. Грачева, нет детей с глубокими поражениями, большинство — с задержкой развития. Их обучают ремеслу, а потом переводят в обычные мастерские на работу. Помещения отли-

чаются хорошей отделкой (стены окрашены масляной краской до потолка), спальни просторные, интерьеры украшены картинами [12, с. 71].

Приют-колония для идиотов Виттекиндсдорф находился около г. Билефельд (Германия). На его территории располагались несколько корпусов. В одном — проживали воспитанники с сильным отставанием в развитии, калеки, идиоты. На первом этаже располагалось детское отделение на 40 ребят в возрасте 4–15 лет. На втором этаже — для людей от 15 до 70 лет. Второй корпус организовывался под лазарет, но в нем разместили 20 больных с глубокими поражениями. Е.К. Грачева пишет, что спальни там маленькие (на 2–3 кровати), есть столовая и коридор, используемый как зал. В третьем корпусе на первом этаже проживали 22 мальчика от 4-х до 14 лет, а на втором — 23 девочки того же возраста. Тут же проводилось обучение по методу Ф. Фребеля (фребелевское отделение). Четвертый корпус — это школа на 5 классов для 57 детей от 6 до 14 лет (из которых только 5 мальчиков). Их распределяли в соответствии с умственными возможностями, а не по возрастному критерию. В младшем классе возраст учеников — 6–12 лет, во втором — 9–14 лет, в третьем — 8–10 лет, четвертом — 12–16 лет, пятом — 13–20 лет. В пятом корпусе — каменная прачечная на 300 работниц, гладильня в деревянных бараках. В шестом в подвальном этаже располагалась кухня, работающая на угле, хлебопекарня, а на первом были устроены две комнаты начальницы, контора и большая столовая с фисгармонией. Также здесь — три бокса (спальня на 14 детей и няню) и помещение для труда. В этом корпусе проживали ребята с отклонениями в развитии, но способные к труду [14, с. 82]. Таким образом, Виттекиндсдорф представлял собой независимый комплекс, в котором воспитанники проживали, обучались, получали медицинскую помощь. Также на территории были предусмотрены административные, хозяйственные помещения.

По инициативе Евангелической церкви Рейнланда и Вестфалии и при поддержке верующих г. Билефельд была приобретена ферма в лесу к югу от города, тем самым положено начало Евангелическому медицинскому учреждению для больных эпилепсией Рейнланда и Вестфалии [15]. Вефель (Bethel, «дом Бога» по-древнееврейски), основанный в 1866 г., принадлежал пастору Фридриху бон Бодельшвингу и носил в начале XX в. неофициальное название «город эпилептиков». Первое построенное здание вмещало 24 больных-эпилептика, но уже в 1869 г. в связи с большим количеством подопечных требовалось расширение. Новый корпус, рассчитанный на 150 человек, был построен в 1973 г. За 50 лет Вефель превратился в развитую сеть, состоящую из нескольких больниц, приютов и колоний для эпилептиков, безработных, бродяг и испорченных, дома для фабричных рабочих, бо-

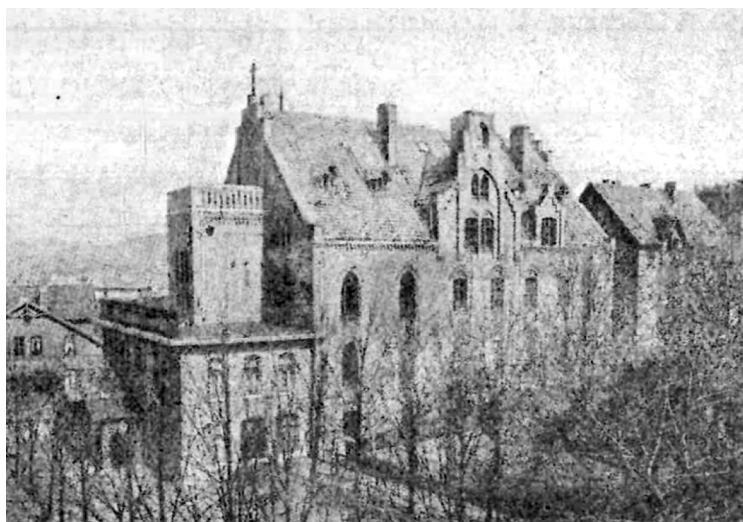


Рис. 1. Назарет [14, с. 100]

Fig. 1. Nazareth [14, p. 100]

гословскую школу и две общины сестер и братьев милосердия [13, с. 95]. В состав Вефеля входили учреждения Назарет и Виеания. Назарет — самое большое за всю историю Германии Евангелическое братство. В нем находилась школа-приют для 105 способных к обучению мальчиков с эпилепсией (рис. 1). В здании существовало функциональное разделение по этажам. На первом располагались классы, лазарет и кухня, на втором — классы для менее способных учеников и столовая, на третьем — спальни (рассчитанные на 18–24 кровати, в том числе мягкие, для тяжело припадочных) и комната управляющего. В кабинетах, как отмечает Е.К. Грачева, для учеников были расставлены парты со скамьями, которые устанавливались на достаточно большом расстоянии друг от друга: в случае падения во время эпилептического приступа ребенок не задевал парту.

Подобное учреждение для девочек — Виеания представляло собой красивый двухэтажный дом с садом и огородом, рассчитанный на 90 девочек от 7 до 25 лет. За каждыми 10 воспитанницами следила одна сестра, которая находилась с ними и в ночное время. Однако обучение было доступно только 60 девочкам (с двумя учительницами и двумя помощницами) [14, с. 110].

В Швеции Е. Грачева посетила несколько аналогичных учреждений. В 25 км от Стокгольма в г. Васби (Väsby) был приют-школа (рис. 2) [14, с. 3]. Это — двухэтажный деревянный дом с двумя лестницами, рассчитанный на 30 воспитанников, с совместным пребыванием мальчиков и девочек. В здании был большой гимнастический зал (который использовали для рекреации в плохую погоду), просторная столовая, кухня, ванная с душем, комнаты для проживания одной начальницы школы и трех учительниц, бельевая, кладовая. На территории был разбит небольшой огород, на котором работали вос-

питанники. По требованиям Швеции того времени на каждом этаже присутствовала пожарная труба и помпа. Е.К. Грачева упоминает, что спальни очень тесные, кровати сдвинуты в них попарно. В каждом классе — не более 10 человек. Обучение в первом классе схоже с курсом эрготерапии — дети практиковались в повседневных навыках: завязывать шнурки, обуваться, одеваться, умываться, мыть посуду и себя (для чего в кабинетах устанавливались раковины и все необходимое). Во вторых и третьих классах, помимо основного (сравнимого с кратким курсом народной школы), много часов отводилось для трудового обучения. Воспитанницы ткали, плели кружева. В отдельном двухэтажном здании находились мастерские, столярные помещения. На первом этаже — кабинеты и оборудование (большая ткацкая и два столярных помещения поменьше), а на втором — комната мастера. Летом у детей не было уроков, и они работали в мастерских по 2 часа ежедневно. После окончания школы большинство воспитанников не могли адаптироваться в социуме. В связи с этим в г. Упсала организовали закрытое учреждение, в котором обеспечивались все условия проживания молодежи с УО, а они, в свою очередь, благодаря имеющимся навыкам ручного труда, полностью окупали свое содержание (изготавливали несложные предметы быта и т.п.). Для них требовалась лишь психологическая поддержка.

Приют-школа для отсталых девочек А. Раппе в Стокгольме (Швеция) располагалась на одной из очень шумных и оживленных улиц города. Это было деревянное строение с обширным двором-садом и оборудованными площадками. В нем много времени отводили занятиям гимнастикой: «гимнастика дисциплинирует их, приучает к послушанию, счету и развивает их как физически, так и умственно» [14, с. 9]; поэтому в здании находился большой гимнастический зал, укомплектованный спортив-

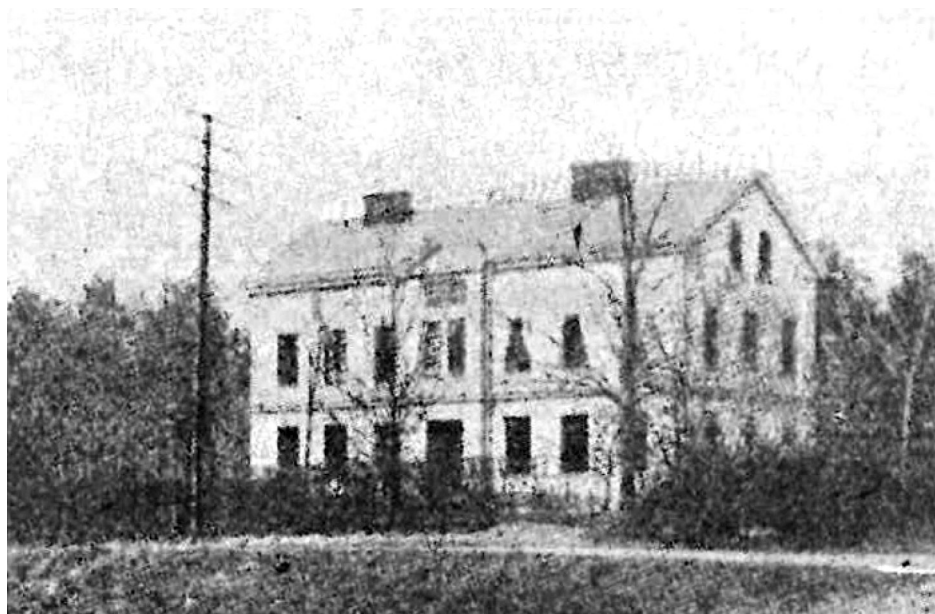


Рис. 2. Приют-школа для отсталых детей в г. Васби [14, с. 3]

Fig. 2. Shelter-school for children with mental disabilities in Vasby [14, p. 3].

ным инвентарем (лестницы, брусья, доски и т.п.). Большую роль в этой школе придавали ручному труду, для чего устраивались специализированные кабинеты для проведения занятий. В отдельном классе «наглядного обучения» дети ухаживали за растениями, птицами, рыбками.

Другой приют для идиотов и эпилептиков близ Стокгольма на 28 детей и 8 служащих был основан на личные средства кронпринца Карла XV [14, с. 14]. Его переоборудовали из дворца: белый каменный дом, окруженный лесом и с другой стороны полем, на которое открывался вид из окон. Вид на лес, как считалось, мог угнетать психику воспитанников и негативно сказываться на их развитии. В основном здании на первом этаже находились: небольшая прихожая; класс, рассчитанный на 15 детей (более развитых — под присмотром одной воспитательницы); класс поменьше на 5 ребят с сильным отставанием в развитии; 3 спальни — одна для эпилептиков на 12 кроватей с бортами и мягкими подушками из сена и две — для ребят без приступов (с обычными кроватями). Второй этаж был отдан для дневного пребывания воспитанников, кабинетов администрации, а также четырех спален для воспитательниц. На территории располагались сопутствующие постройки. В некоторых комнатах сохранили gobelены, мебель из красного дерева. Печи ограждались защитными сетками, также сетки имелись в ванной, чтобы во время эпилептического приступа ребенок не утонул. В основном в этой школе лишь ухаживали за детьми, обучением их не занимались, не видя реально достижимого определенного уровня развития. Ребята занимались ручным трудом: ткали постельное белье, занавеси, скатерти, мальчики сколачивали требующуюся мебель.

Одним из широко известных учреждений второй половины XIX в. в Швейцарии, в котором не только занимались оздоровлением, но и образованием умственно-отсталых, была школа-приют Гуггенбюля (1816–1863 гг.) [7, с. 46]. Такими болезнями, как идиотизм и кретинизм, Иоганн Якоб Гуггенбюль заинтересовался, когда учился в медицинском университете. Свой проект, учитывающий требования обучения и оздоровления больных детей, он представил на заседании Венского общества врачей-испытателей. В 1841 г. на склоне горы Абендберг, близ швейцарского городка Интерлакена открыла свои двери приют-школа на 50–60 пациентов [16, с. 9] — уникальное, передовое сооружение (рис. 3). По замыслу Гюггенбюля место в живописной местности высоко над уровнем моря было выбрано неслучайно — по данным того времени в горах реже встречались люди с отставанием в развитии. Вот как описывает окружающий пейзаж современник Гюггенбюля В. Паркер: «Величественная цепь снежных гор Эйхер, Монч и Юнгфрау видна во всем своем величии, в то время как под ним лежит Бриенцское озеро в Интерлахене» [16, с. 10]. В этой школе оборудовали: бассейн, площадки для игр, множество залов, кабинетов и спален. Благодаря большим окнам интерьеры имели превосходное освещение. На прилегающей территории находились отдельные помещения для персонала, сад, огород, луг. В школу принимались и здоровые дети, это была первая инклюзивная школа. Гюггенбюль считал, что ученикам с отставанием в развитии в качестве терапии требуется сочетание физической нагрузки, занятий на свежем воздухе (на территории имелись площадки и крытый гимнастический зал), занятий музыкой. Идеи и методы воспитания, образования и оздоровления дали положительные



Рис. 3. Абендбергский приют [15]

Fig. 3. Abendberg Shelter [15]

результаты. Абендбергский приют стал примером для многих педагогов, врачей, психиатров того времени. Слава об успехах в развитии обучающихся в нем достигла даже Америки. Такая популярность и зависть бывших соратников Гуттенбуля погубила благое начинание. И скоро школа-приют перестала существовать.

Около Парижа в Жантйи (Gantilly) располагался приют Валле (Vallée) для 240 девочек идиоток и эпилептичек. Главный корпус — белое каменное здание, похожее на богатый барский дом, построенное на склоне горы и «совершенно не напоминавшее больницу»: лестницы, балконы, большая терраса, с которой открывался прекрасный вид [13, с. 52]. На территории, окруженной забором, располагались небольшие домики: административный, помещения для служащих, прачечная и водолечебница в саду. На первом этаже главного корпуса находился большой зал, две комнаты для ребят с эпилепсией, два изолятора, столовая. Во дворе сеткой размерами около 4×2 м отгораживали небольшой участок для прогулок детей. Класс был рассчитан на 32 девочки, при них одна учительница.

Вопрос объемно-планировочного, технического решения школьного здания для детей с отсталостью раскрыл Б. Мэннель [18, с. 132] — руководитель одной из старейших подобных школ в Германии в г. Галле. Он был убежден, что невозможно инвалидам дать полноценное, доступное образование без формирования специализированной архитектурной среды. В его книге «Школы для умственно отсталых детей» этой проблеме отводится отдельная глава [18, с. 132], в которой описываются рекомендованные архитектурные, объемно-планировочные, типологические и иные особенности таких школ. Б. Мэннель советовал устраивать в маленьких населенных пунктах один вспомогательный класс при начальной школе. В более крупных организовывать

несколько, но в разных концах города, чтобы упростить их доступность. Когда количество учеников данных школ достигнет порога, достаточного для организации самостоятельного здания школы, городской администрацией она должна быть построена, с учетом всех последних требований к качеству объемных и технических решений. Идеальным расположением автор считал выбор участка на границе рабочего района (многие ученики были из семей низшего класса) и окраины с садом. На территории близ школьного здания рекомендовалось располагать: гимнастический зал, площадку для игр, сад. В учебном корпусе — комнаты заведующего и сторожа, учительские с хорошим естественным освещением, медкабинет, мастерские, ванную, санузлы, классы устраивать по типу амфитеатра; в качестве покрытия пола во входной группе и классах использовать линолеум. Обустройству ванной Б. Мэннель уделял особое внимание. Предлагалось при ней устраивать раздевалки; проектировать большое количество кабинок, доступных одновременно для всего класса; устраивать несколько теплых полов. В то время на одного врача (он был приходящим) обычной школы приходилось 500–4000 учеников [12, с. 15], в специальной школе Б. Мэннель рекомендует постоянное пребывание доктора. Медкабинет мог использоваться и для исследования здоровья учеников, и для оказания медицинской помощи, и проведения прививок (оспопрививание), и для помощи во время эпилептического приступа (для этого требовалось наличие матрасов). Мастерские надлежало оборудовать токарными и столярными станками, столами, скамьями, шкафами для хранения материалов, одежды, инвентаря. Гимнастический зал Б. Мэннель советовал соединять крытым переходом с основным зданием и оборудовать его специальными тренажерами, которые улучшат развитие больных детей, а на территории располагать

сад, площадки для игр, грядки для выращивания растений. Предлагалось размещать аквариумы и террариумы на подоконниках классных комнат для знакомства с животным миром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа зарубежного опыта строительства и эксплуатации первых образовательных и воспитательных учреждений для детей с УО следует, что объемно-планировочным решениям таких школ внимание не уделялось. В планировочной структуре определены положительные и отрицательные черты. Положительные:

- чаще всего такие учреждения представляли собой не самостоятельное здание школы, а целый комплекс с сопутствующими постройками (учебные, спальные, административные, хозяйственные, лечебно-оздоровительные);
- в объемно-планировочных решениях преобладало поэтажное функциональное деление (классы для детей с разными образовательными возможностями, лечебно-медицинское отделение, административные, спальные помещения);
- в некоторых имелись отдельные корпуса для обучения и проживания детей с учетом их уровня развития;
- малое количество учеников в одном классе, объединение их в соответствии с ментальными возможностями, не по возрасту;
- наличие условий (отдельные кабинеты, оборудование в них) для обучения ремеслам и ручному труду, занятий гимнастикой, прогулок и игр на свежем воздухе.

К неблагоприятным планировочным чертам относятся:

- расположение в существовавших зданиях, не приспособленных для новой функции (напри-

мер, бывших дворцов, особняках), и, как следствие, невозможность создать условия для качественного выполнения требующихся задач;

- организация школ в многоэтажных зданиях при отсутствии легкого доступа в них инвалидов;
- смешение функций помещений в одном корпусе;
- недостаточно рациональное функциональное зонирование;
- объединение больных разных возрастных категорий в одном учреждении.

Ценным является опыт создания вспомогательных классов, служащих промежуточным звеном между школами для детей без особенностей развития и детьми с глубокими поражениями мозга. Наличие и равномерное распределение таких классов по школам населенных пунктов давало возможность полноценного образования детей, которые плохо усваивали материал, но, в то же время, имели возможность находиться в обществе обычных детей. Практика подобной системы актуальна сегодня для нашей страны, когда обучение детей-инвалидов может быть организовано в обычных школах, в свободном классе. Отсутствие финансирования и низкая заинтересованность властей в вопросе образования детей с УО приводили к тому, что целенаправленная архитектурная модернизация зданий не осуществлялась. Данная работа подтверждает, что сочетание многих факторов в середине XIX в. позволило начать формирование системы обучения лиц с УО. Однако проектированием комфортных объемно-планировочных условий практически не занимались. На первом месте, в большинстве случаев, было стремление организовать качественный образовательный процесс в существующей архитектурной среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чигрина А.Я. Инклюзивное образование детей-инвалидов с тяжелыми физическими нарушениями как фактор их социальной интеграции: автореф. дис. ... канд. соц. наук. Нижний Новгород, 2011. 23 с.
2. Ключко А.Р., Коровина Е.И. Развитие архитектуры школьных зданий в России и мире // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017. № 2 (39). С. 98–113. URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/2kvart17/PDF/08_AMIT_39_KLOCHKO_KOROVINA_PDF.pdf
3. Рейсвейк К.М. фан. Специальное образование в Нидерландах. СПб. : CROSS, 1993. 44 с.
4. Сигал Н.Г. Современное состояние и тенденции развития инклюзивного образования за рубежом: автореф. дис. ... канд. пед. наук. Казань, 2016. 23 с.
5. Постовский Н.П. Вспомогательные школы за границей: развитие, современное положение и организация их. М. : Т-во скоропеч. А.А. Левенсон, 1912. 174 с.
6. Sengstock W.L., Magerhans-Hurley H., Sprotte A. Germany, cradle of American special education for persons who are mentally retarded // *Education and Training in Mental Retardation*. 1990. Vol. 25. Issue 1. Pp. 4–14.
7. Новиков Ф.М. История воспитания и обучения умственно-отсталых. М. : Учпедгиз, 1939. 164 с.
8. Вспомогательные школы для отсталых детей : сб. под ред. Е.В. Герье и Н.В. Чехова. М., 1923.
9. Граборов А.Н. Вспомогательная школа (школа для умственно-отсталых детей). М. : Петроград: Государственное издательство, 1923. 328 с.

10. Замский Х.С. Умственно отсталые дети. История их изучения, воспитания и обучения с древних времен до середины XX века. М. : НПО «Образование», 1995.

11. Щеглов А. Вспомогательные школы для малоодаренных и неуспевающих детей в Германии // Русская школа. 1911. № 5–6. С. 13–31.

12. Никитин П.Б. Вспомогательные школы для отсталых детей в Германии и Швейцарии. М. : Гор. тип., 1911. 42 с.

13. Щеглов А. Вспомогательные школы для малоодаренных и неуспевающих детей в Германии // Русская школа. 1911. № 7–8. С. 30–47.

14. Грачева Е.К. Приюты-школы для детей идиотов и эпилептиков в Швеции, Франции и Германии. СПб. : типо-лит. М.П. Фроловой, 1909. 156 с.

15. Никифоров И. Вефиль: дом Божий для эпилептиков. URL: <https://www.miloserdie.ru/article/vefil-dom-bozhij-dlya-epileptikov/>

16. Parker J.W. Some account of cretinism, and the institution for its cure, on the Abendberg, near Interlachen, in Switzerland. London, 1843.

17. Institution of the Abendberg for the care of cretins. URL: <https://wellcomecollection.org/works/baau2txs>

18. Мэннелль Б. Школы для умственно отсталых детей. СПб. : Посев, 1911.

19. Малофеев Н.Н. Специальное образование в меняющемся мире. М. : Просвещение, 2018. 446 с.

20. Барабаш М.В. Принципы и методы архитектурно-планировочной модернизации школьных зданий : на примере Приднестровской Молдавской республики : дис. ... канд. архитектуры. Ростов-на-Дону, 2016.

Поступила в редакцию 8 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Стрельникова Елена Юрьевна — архитектор 2-й категории; Архитектурная мастерская ИП «Щербинина Ю.Д.»; 350000, г. Краснодар, ул. Коммунаров, д. 76; РИНЦ ID: 846848; lena.str.2011@yandex.ru;

Труфляк Ирина Сергеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры; Кубанский государственный аграрный университет (КубГАУ); 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13; SPIN-код: 2653-4930, ORCID: 0000-0001-6824-0199; trufflyak.irina@mail.ru.

REFERENCES

1. Chigrina A.Y. *Inclusive education of disabled children with severe physical disabilities as a factor of their social integration: abstract of the diss. ... candidate of sociological sciences*. Nizhnij Novgorod, 2011; 23. (rus).

2. Klochko A.R., Korovina E.I. Development of architecture of school buildings in Russia and the world. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017; 2(39):98-113. URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/2kvart17/PDF/08_AMIT_39_KLOCHKO_KOROVINA_PDF.pdf (rus.).

3. Rijswijk K.M. fan. *Special education in the Netherlands*. St. Petersburg, CROSS, 1993; 44. (rus.).

4. Segal N. G. *Current state and trends in the development of inclusive education abroad*. Kazan, 2016; 23. (rus).

5. Postovsky N.P. *Auxiliary schools abroad: development, current situation and their organization*. Moscow, Association of skoropechat. A.A. Levenson, 1912; 174. (rus).

6. Sengstock W.L., Magerhans-Hurley H., Sprotte A. Germany, cradle of American special education for persons who are mentally retarded. *Education and Training in Mental Retardation*. 1990; 25(1):4-14.

7. Novikov F.M. *History of education and training of mentally retarded*. Moscow, Uchpedgiz, 1939; 164. (rus).

8. Auxiliary schools for backward children: collection ed. by E.V. Guerrier and N.V. Chekhov. Moscow, 1923. (rus).

9. Graborov A.N. *Auxiliary school (school for mentally retarded children)*. Moscow, Petrograd, State publishing house, 1923; 328. (rus).

10. Zamsky H.S. *Mentally retarded children. History of their study, education and training from ancient times to the middle of the XX century*. Moscow, NGO “Education”, 1995. (rus).

11. Shcheglov A. Auxiliary schools for underprivileged and underachieving children in Germany. *Russian school*. 1911; 5-6:13-31. (rus).

12. Nikitin P.B. *Auxiliary schools for backward children in Germany and Switzerland*. Moscow, City printing house, 1911; 42. (rus).

13. Shcheglov A. Auxiliary schools for underprivileged and underachieving children in Germany. *Russian school*. 1911; 7-8:30-47. (rus).

14. Gracheva E.K. *Shelters-schools for children of idiots and epileptics in Sweden, France and Germany*. St. Petersburg, Tipo-lit. M.P. Frolova, 1909; 156. (rus).
15. Nikiforov I. *Bethel: the house of God for epileptics*. URL: <https://www.miloserdie.ru/article/vefil-dom-bozhij-dlya-epileptikov/> (rus).
16. Parker J.W. *Some account of cretinism, and the institution for its cure, on the Abendberg, near Interlachen, in Switzerland*. London, 1843.
17. Institution of the Abendberg for the care of cretins. URL: <https://wellcomecollection.org/works/baau2txs>
18. Mannel B. *Schools for mentally retarded children*. St. Petersburg, Posev, 1911. (rus).
19. Malofeev N. N. *Special education in a changing world*. Moscow, Education, 2018; 446. (rus.).
20. Barabash M. V. *Principles and methods of architectural and planning modernization of school buildings: on the example of the Pridnestrovian Moldavian Republic: dissertation ... candidate of architecture*. Rostov-on-Don, 2016; 171. (rus.).

Received February 8, 2020.

Adopted in a revised form on March 2, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Elena Yu. Strelnikova** — architect of the 2nd category; **Architectural workshop of IP “Shcherbinina Yu.D.”**; 76 Kommunarov st., Krasnodar, 350000, Russian Federation; ID RISC: 846848; lana.str.2011@yandex.ru;

Irina S. Truflyak — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Architecture; **Kuban State Agrarian University (Kuban SAU)**; 13 Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation; SPIN-code: 2653-4930, ORCID: 0000-0001-6824-0199; truflyak.irina@mail.ru.

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

УДК 624.044:628.4.03

DOI:10.22227/1997-0935.2020.6.776-788

Моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых коммунальных отходов

В.Г. Офрихтер, Г.М. Батракова, Н.Н. Слюсарь

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Полигоны депонирования представляют собой массивы складированных отходов и являются специальной инженерной конструкцией, предназначенной для безопасной изоляции их содержимого от окружающей среды. В состав полигонов входят газоотводящие и дренажные системы, подстилающие и покровные изолирующие системы. Основным компонент этой конструкции — отходы. Одна из наиболее распространенных проблем, приводящих к различным инцидентам на полигонах, — неправильная оценка их устойчивости. Основным фактором расчета и проектирования полигонов служит прогноз их напряженно-деформированного состояния (НДС). Исследованиями многих авторов установлено, что значительное влияние на свойства ТКО оказывает биологическое разложение.

Материалы и методы. Показаны методика и результаты численного моделирования НДС запроектированного объекта «Полигон ТБО». Объект — это массив твердых коммунальных отходов (ТКО) высотой 38 м. Отходы укладываются слоями толщиной 1,75 м. Каждый слой перекрывается покровным слоем суглинка толщиной 0,25 м. Моделирование НДС ТКО, в том числе биологической ползучести, осуществлялось с помощью модели слабого грунта с учетом ползучести SSC.

Результаты. Приведены результаты численного моделирования НДС массива отходов на всех этапах заполнения и в постэксплуатационный период. Выполнена оценка увеличения вместимости полигона за счет осадки мусора в результате уплотнения и биологической ползучести. Представлен анализ устойчивости полигона и потенциальные механизмы разрушения на разных этапах заполнения и эксплуатации.

Выводы. Численное моделирование НДС массива ТКО с использованием модели слабого грунта с учетом ползучести позволяет учесть механизм биологической ползучести и спрогнозировать увеличение вместимости полигона за счет уплотнения отходов под нагрузкой при послойном заполнении хранилища. Анализ устойчивости массива ТКО дает возможность представить механизм разрушения и определить коэффициенты устойчивости на любом этапе заполнения полигона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: твердые коммунальные отходы, механическая ползучесть, биологическая ползучесть, составная модель ползучести, модель слабого грунта с учетом ползучести, вместимость полигона ТКО, устойчивость массива ТКО

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Офрихтер В.Г., Батракова Г.М., Слюсарь Н.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых коммунальных отходов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 776–788. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.776-788

Modeling the stress-strain state of of a municipal solid waste landfill

Vadim G. Ofrikhter, Galina M. Batrakova, Natalia N. Sliusar

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

ABSTRACT

Introduction. The process of municipal solid waste (further MSW) generation is inextricably linked with the life of humanity. Every day each person generates some, a small amount of garbage. As a result millions of tons of MSW are generated daily in the world which are unsuitable for further use and require disposal. There are various ways of handling MSW including their treatment, recycling and disposal. In Russian Federation the vast majority of MSW are currently located on the specially equipped facilities — waste landfills. To date the most common waste management strategy remains their placement in a landfill. Waste landfills are arrays of stored waste and are special engineering structures designed for the safe isolation of their contents from the environment. Landfill includes gas exhaust and leachate drainage systems, liner and cover systems. The main component of this structure is waste itself. Mechanical stability of landfills should be provided at all stages of waste storage as well as after it complete filling to designed capacity and at post-closure stage. As the result of deformation of unstable waste, all landfill systems can be destroyed up to the collapse of garbage array leading to the significant environmental and other consequences. One of the most common problems leading to the various incidents at landfills is an incorrect assessment of their stability. MSW landfill is a complex multiphase system in which various interacting processes occur simultaneously. The main factor in the calculation and design of landfills is the forecast of their settlements. Studies by

many authors have established that biological decomposition has a significant impact on the properties of MSW after which the waste is considered as the landfill soil with a particle size of up to 20 mm.

Materials and methods. The paper presents the methodology and the results of numerical modeling of stress-strain state of the designed object "Waste Landfill". The facility is an array of municipal solid waste of 38 meters high. Waste is stacked in the layers of 1.75 m thick. Each waste layer is covered by the loam cover of 0.25 m thick. Stress-strain state of municipal solid waste including biological creep was modelled using well-known "Soft-Soil-Creep model" (SSC-model).

Results. The results of numerical simulation of stress-strain state of the waste pile at all stages of the filling and in the post-closure period are presented. An assessment of the increase in the capacity of the landfill due to the compaction and biological creep has been performed. Stability analysis of the landfill and potential failure mechanisms at different stages of filling and operation are presented.

Conclusions. Numerical modeling of stress-strain state of the MSW array using the "Soft-Soil-Creep model" allows to analyze the stability of the waste pile at any stage of landfill filling and evaluate the increase in landfill capacity due to the waste settlement taking into account the mechanical creep and biocompression during layer-by-layer filling.

KEYWORDS: municipal solid waste, mechanical creep, biological creep, composite model of the waste, soft soil model with creep, capacity of waste landfill, stability of waste massif

FOR CITATION: Ofrikhter V.G., Batrakova G.M., Sliusar N.N. Modeling the stress-strain state of a municipal solid waste landfill. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):776-788. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.6.776-788 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В статье приводятся результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) запроектированного объекта «Полигон ТБО». Объект представляет собой массив твердых коммунальных отходов (ТКО) высотой 38 м. Отходы укладываются слоями толщиной 1,75 м. Каждый слой перекрывается покровным слоем суглинка толщиной 0,25 м.

Массив отходов — это усеченная пирамида с основанием размерами 460 × 170 м. Первая очередь полигона состоит из шести слоев ТКО толщиной по 2 м и одного слоя толщиной 2,25 м, поверх которого располагается слой суглинка толщиной 0,75 м. Наружные откосы на первой очереди выполняются заложением 1:2. Общая высота первой очереди полигона составляет 15 м, теоретический объем — 969 390 м³. На второй очереди укладывается 5 слоев отходов толщиной по 2 м с наружными откосами 1:1. После укладки второй очереди теоретическая высота составит 25 м, теоретический объем отходов, укладываемых во вторую очередь, — 468 070 м³. В третью очередь укладывается 6 слоев отходов толщиной по 2 м с наружными откосами 1:1, которые перекрываются сверху слоем суглинка толщиной 1 м. После заполнения полигона и устройства покровного слоя теоретическая высота составит 38 м, теоретическая вместимость третьей очереди — 432 756 м³. Таким образом, теоретическая вместимость полигона составит 1 870 216 м³.

Отходы доставляются на полигон мусоровозами, насыпной плотностью 210–240 кг/м², после укладки и уплотнения начальная плотность уложенных на полигон отходов составляет 700 кг/м³. В течение года на полигон поступает 100 000 т ТКО. После укладки покровного слоя суглинка толщиной 0,25 м поверх каждого слоя отходов толщиной 1,75 м в связи со значительными осадками

мусора материал каждого слоя представляет собой смесь отходов и грунта прослойки удельным весом $(7,0 \cdot 1,75 + 19,0 \cdot 0,25)/2 = 8,5$ КН/м³.

Твердые коммунальные отходы — грунтоподобный материал, армированный произвольно ориентированными волокнами. Этому материалу присущи одновременно свойства, характерные как для связных грунтов, например, сцепление, так и для несвязных грунтов, например, высокий коэффициент фильтрации порядка 10⁻³ см/с. Механические свойства ТКО как грунтоподобного материала и анализ НДС ТКО приведены в опубликованных результатах исследований. В статьях [1, 2] анализируются прочностные свойства ТКО, [3, 4] — деформационные, [5, 6] — и прочностные, и деформационные. Состав и свойства отходов на разных фазах биологического разложения анализируются в трудах [7, 8]. В публикации [9] представлены результаты полевых исследований свойств отходов. Методика определения удельного веса твердых частиц отходов изложена в работе [10]. В процессе разложения органической составляющей свойства ТКО значительно изменяются [2, 9]. По итогам изменения свойств ТКО разработаны различные модели НДС, для реализации которых требуются данные о различных свойствах отходов. Составные модели показаны в работах [11–13], деформационные модели — в [14–15]. Различные подходы к учету биологического разложения при расчете осадок и вместимости полигонов приведены в работах [16, 17]. В статье [18] обосновывается применение модели слабого грунта для расчета осадок массива отходов, а в труде [19] показана эквивалентная линейно-временная модель отходов. Наиболее надежными являются модели, в которых разработан алгоритм анализа модели осадок массива отходов, наблюдения за которыми общедоступны и не требуют специального оборудования и методик наблюдения и оценки [11, 12, 16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обоснование принятой модели осадки ТКО

В работе [7] представлены данные по содержанию органического углерода в массиве отходов, что позволяет определить долю разлагающихся органических веществ за 60 лет наблюдений, составляющую 18 % от общего объема отходов, а также аппроксимировать полученные значения кривой биологической ползучести, которая описывается выражением (1) [16]:

$$\varepsilon_{bio} = \varepsilon_{bio, \text{кон}} (1 - e^{-kt}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{bio, \text{кон}}$ — окончательная относительная осадка отходов в результате разложения органической составляющей, равная для рассматриваемого полигона 0,18; t — время с момента укладки отходов, в годах.

Значение коэффициента k было подобрано в программе Excel путем максимального приближения теоретической кривой к экспериментальной. Его значение составило 0,15. При подстановке полученных значений в выражение (1) уравнение биологической ползучести ТКО на рассчитываемом полигоне принимает вид:

$$\varepsilon_{bio} = 0,18 (1 - e^{-0,15t}). \quad (2)$$

Выражение (1) описывает механизм затухания биологической ползучести подобно механизму затухания механической ползучести. Биологическая и механическая ползучесть ТКО могут быть описаны одной и той же математической моделью механической ползучести. Хорошо разработана и многократно опробована модель слабого грунта с учетом ползучести (SSC-model) [20]. Для применения мо-

дели при расчете деформаций массива ТКО необходимо определить конечную осадку, которая может развиваться в процессе того или иного типа ползучести и константы скорости механической ползучести и биологического разложения.

Характеристики материалов и параметры расчетной модели

Для расчета свойств слоев ТКО применена составная модель отходов [12, 13], учитывающая упругие и пластические деформации, а также развивающиеся во времени деформации механической ползучести и биологического разложения. Параметры составной модели приведены в табл. 1. Схема полигона показана на рис. 1.

Схема полигона состоит из 18 слоев ТКО, перекрытых сверху слоем суглинка толщиной 1 м. Полигон располагается на основании из суглинка тугопластичного высотой 1 м, подстилаемого толщей аргиллита сильновыветрелого.

Численное моделирование выполнено с использованием модели слабого грунта с учетом ползучести (модель SSC) [20]. Свойства ТКО рассчитаны из параметров составной модели (табл. 1) и приведены в табл. 2.

Удельный вес отходов после укладки на полигон составляет 7,0 кН/м³. Влажность ТКО — 40 %. В статье [10] приведены данные по определению удельного веса твердых частиц ТКО. С их учетом удельный вес частиц ТКО оценивается 13,0 кН/м³, удельный вес частиц смеси грунта и мусора — $(13,0 \cdot 1,75 + 27,0 \cdot 0,25)/2 = 14,75$ кН/м³. Тогда удельный вес сухих отходов (смеси отходов и грунта прослойки) будет равен 6,07 кН/м³, а начальный коэффициент пористости составит 1,43.

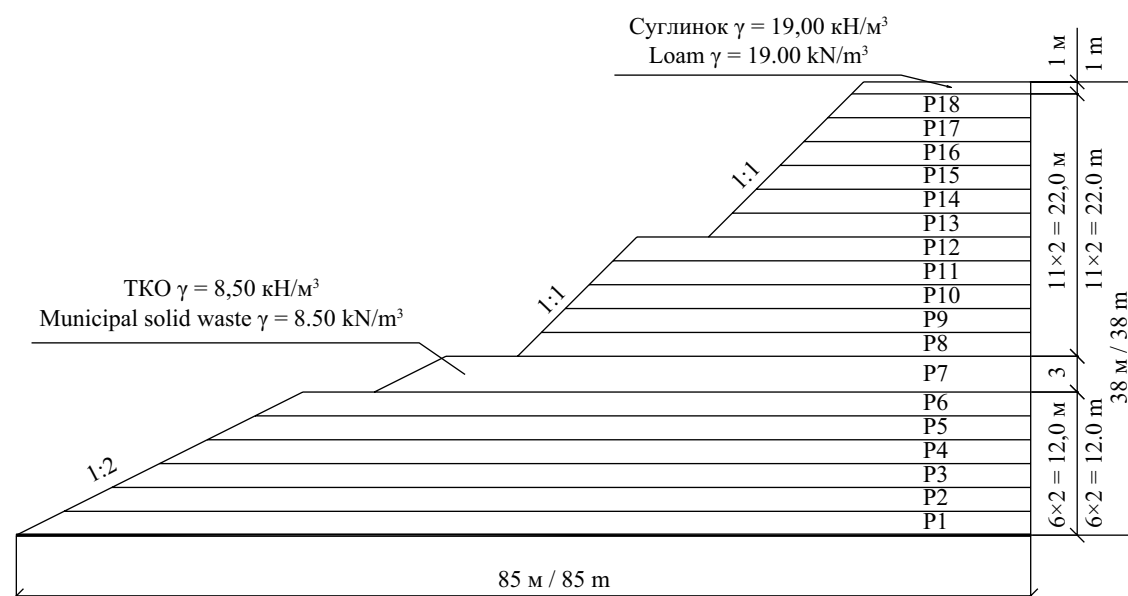


Рис. 1. Схема полигона ТКО (левая часть до оси симметрии)

Fig. 1. Scheme of municipal solid waste landfill (left part to the axis of symmetry)

Табл. 1. Значения параметров составной модели ТКО

Table 1. MSW composite model parameters values

№ / No.	Параметр / Parameter	Обозначение / Symbol	Значение / Value
1	Модифицированный коэффициент компрессии / Modified compression index	λ^*	0,06209
2	Коэффициент набухания [12, 13] / Swelling index [12, 13]	κ^*	0,0141
3	Начальный коэффициент пористости / Initial void ratio	e_0	1,43
4	Угол внутреннего трения [21] / Angle of internal friction [21]	ϕ'	25
5	Коэффициент переуплотнения / Overconsolidated ratio	OCR	1
6	Удельный вес / Unit weight	γ , КН/м ³	8,5
7	Константа скорости механической ползучести [12, 13] / The mechanical creep rate constant [12, 13]	c , сут ⁻¹	0,001790
8	Коэффициент механической ползучести [12, 13] / Coefficient of mechanical creep [12, 13]	b , м ² /КН	0,000572
9	Суммарная осадка биоразложения / Total settlement ob biodegradation	E_{dg}	0,18
10	Константа скорости биоразложения / The biodegradation rate constant	d , год ⁻¹	0,15

Табл. 2. Свойства грунтов моделируемого полигона ТКО

Table 2. Soil properties of the modelled solid municipal waste landfill

Параметры / Parameters	Обозначение / Symbol	Суглинок / Loam	Аргиллит / Mudstone	ТКО / Municipal solid waste	Единица измерения / Unit of measure
Модель / Model	—	М-К	М-К	SSC	—
Тип поведения / Type of behaviour	—	Дренированный / Drained	Дренированный / Drained	Дренированный / Drained	—
Удельный вес сухого грунта / Unit weight of dry soil	γ_d	14,3	17,3	5	кН/м ³ / kN/m ³
Удельный вес грунта / Unit weight of the soil	γ	19	20,5	7	кН/м ³ / kN/m ³
Удельный вес частиц / Unit weight of the solids	γ_s	27,0	27,5	13,0	кН/м ³ / kN/m ³
Влажность / Moisture	W	0,329	0,186	0,4	д.е. / unit fraction
Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении / Filtration koefficient in horisontal direction	k_x	0,001	1,0	0,86	м/сут / m/day
Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении / Filtration koefficient in vertical direction	k_y	0,001	1,0	0,86	м/сут / m/day
Модуль деформации / Deformation modulus	E_{ref}	5000	13 700	1000	кН/м ² / kN/m ²
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	ν	0,30	0,20		
Сцепление / Cohesion	c	10	39	10	кН/м ² / kN/m ²
Угол внутреннего трения / Angle of internal friction	ϕ	12	23	25	Градусы
Угол дилатансии / Dilatancy angle	ψ	0	0		Градусы

Параметры / Parameters	Обозначение / Symbol	Суглинок / Loam	Аргиллит / Mudstone	ТКО / Municipal solid waste	Единица измерения / Unit of measure
Модифицированный коэффициент набухания / Modified swelling index	κ^*			0,0141	
Модифицированный коэффициент компрессии / Modified compression index	λ^*			0,06209	
Модифицированный коэффициент ползучести (см. табл. 3) / Modified creep ratio (table 3)	μ^*				
Коэффициент Пуассона при разгрузке — повторном нагружении / Poisson's ratio during unloading — reloading	ν_{ur}			0,15	
Коэффициент компрессии C_c / Compression index				0,347	
Коэффициент набухания C_s / Swelling index				0,0394	
Коэффициент ползучести при вторичном уплотнении C_a (см. табл. 3) / Creep ratio under secondary compression (table 3)					
Начальный коэффициент пористости e_{init} / Initial void ratio		0,89	0,59	1,43	

Модуль общей деформации ТКО оценивается в 1 МПа [22], а коэффициент относительной поперечной деформации ТКО — 0,25 [23]. Коэффициент компрессии ТКО будет равен 0,347.

Модифицированные коэффициенты компрессии, набухания и ползучести модели SSC связаны с коэффициентами компрессии, набухания и ползучести известными выражениями [20].

Параметры модели SSC рассчитываются для каждого из 18 слоев отходов.

Относительную осадку на этапе вторичной консолидации можно определить по известному выражению (3) [24]:

$$\varepsilon_s = \frac{C_a}{1 + e_0} \lg t, \quad (3)$$

где ε_s — относительная осадка на этапе вторичной компрессии, которая является суммой двух составляющих: осадки, обусловленной механической ползучестью, и осадки вследствие биологической ползучести. Суммарная осадка при вторичной консолидации рассчитывается по составной модели [13]; t — время, прошедшее после завершения фазы первичной консолидации.

По предложению [18] осадку C_a можно рассчитать по формуле (4):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c + \varepsilon_b = \frac{C_a}{1 + e_0} \lg t, \quad (4)$$

где ε_c — осадка, обусловленная механической ползучестью; ε_b — осадка, развивающаяся при разло-

жении органической составляющей — биологической ползучести (биологическом разложении).

Расчет коэффициента вторичной консолидации необходимо выполнять для каждого из 18 слоев отходов, поскольку в процессе укладки отходов и увеличения высоты полигона в слоях отходов давление будет увеличиваться.

Расчет параметров для слоя отходов P_{18}

Расчет для слоя P_{18} ведется для 21 900 сут (60 лет).

Высота слоя отходов — 2,0 м. Нагрузка от собственного веса отходов рассчитывается в уровне середины слоя:

$$p_0 = 8,5 \cdot 1 = 8,5 \text{ кН/м}^2.$$

Дополнительно прикладывается нагрузка от покровного слоя суглинка $\Delta p'$ (см. рис. 1).

$$\Delta p' = 19,0 \cdot 1,0 = 19,0 \text{ кН/м}^2.$$

Коэффициент компрессии $C_c = 0,347$.

Коэффициент пористости за время первичной компрессии изменится на величину Δe :

$$\begin{aligned} \Delta e &= C_c \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = \\ &= 0,347 \cdot \lg \frac{8,5 + 19,0}{8,5} = 0,347 \cdot 0,51 = 0,177; \end{aligned}$$

$$e_1 = e_0 - \Delta e = 1,43 - 0,177 = 1,253.$$

К окончанию первичной компрессии величина коэффициента пористости составит $e'_0 = 1,253$. Далее рассчитывается коэффициент вторичной кон-

солидации и модифицированный коэффициент ползучести. Конечная относительная деформация ТКО представляет собой сумму относительной осадки при механической ползучести и относительной осадки при биологическом разложении:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c + \varepsilon_b = 0,011 + 0,18 = 0,191;$$

$$C_\alpha = 0,0992;$$

$$\mu^* = 0,0191.$$

По такой же схеме рассчитываются параметры для слоев P_{17}/P_1 . Результаты расчетов для заполненного полигона сведены в табл. 3.

Годовое количество отходов, поступаемых на полигон, составляет 100 000 т, что позволяет рассчитать теоретические сроки укладки отходов в каждый из 18 слоев (см. табл. 3).

Расчет выполняется в программе Plaxis 2D в 19 этапов. Каждый из первых 18 этапов расчета соответствует укладке одного слоя отходов. На 19 этапе укладывается покровный слой суглинка толщиной 1 м. Время укладки каждого слоя зависит от объема отходов в слое (см. табл. 3). После 19 этапов расчета, соответствующих укладке мусора и покровного слоя суглинка, производится анализ консолидации заполненного полигона. Время консолидации заполненного массива отходов принято 18 400 дней.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета осадок массива отходов

Численное моделирование массива отходов с использованием модели SSC позволяет рассчитать осадки в слоях отходов и их развитие во времени с момента укладки мусора. Такие расчеты дают возможность оценить увеличение вместимости свалки против проектных значений. По результатам выполненных расчетов осадка верха полигона к моменту его полного заполнения за 3433 дня составит 745 см. Расчетная отметка гребня откоса (точка А на рис. 2) к моменту заполнения свалки +29,55, в то время как проектная отметка этой точки +37,00. Вместимость полигона возрастает против расчетной на 19,5 %, при этом необходимо иметь в виду консолидацию, которая будет продолжаться при укладке дополнительного количества отходов, что приведет к дополнительному увеличению вместимости полигона. В результате уплотнения увеличится удельный вес отходов, который при укладке составляет $\gamma_0 = 8,50 \text{ кН/м}^3$.

Схема расчетных точек приведена на рис. 2.

На рис. 3, 4 показаны результаты развития осадок во времени. На рис. 3 график осадки каждого из рассчитанных слоев начинается с отметки, соответствующей осадке массива ранее уложенных отходов.

Табл. 3. Значения $\Delta p'$, C_α , μ^* для слоев P_{18}/P_1 полностью загруженного полигона

Table 3. Values $\Delta p'$, C_α , μ^* for the layers P_{18}/P_1 of fully loaded landfill

Обозначение слоя / Layer designation	p_0 , кН/м ² / kN/m ²	$\Delta p'$, кН/м ² / kN/m ²	C_α	μ^*	Сроки укладки ТКО, сут / Municipal solid waste laying time, days
P_{18}	6,125	19	0,0991	0,0191	103
P_{17}	6,125	36	0,1008	0,0201	110
P_{16}	6,125	53	0,1033	0,0211	118
P_{15}	6,125	70	0,1062	0,0220	125
P_{14}	6,125	87	0,1093	0,0230	133
P_{13}	6,125	104	0,1126	0,0240	141
P_{12}	6,125	121	0,1160	0,0250	149
P_{11}	6,125	138	0,1194	0,0259	157
P_{10}	6,125	155	0,1228	0,0269	165
P_9	6,125	172	0,1263	0,0279	173
P_8	6,125	189	0,1298	0,0289	182
P_7	7,000	220	0,1375	0,0307	198
P_6	6,125	239	0,1402	0,0317	222
P_5	6,125	256	0,1438	0,0327	241
P_4	6,125	273	0,1473	0,0337	261
P_3	6,125	290	0,1509	0,0346	281
P_2	6,125	307	0,1544	0,0356	302
P_1	6,125	324	0,1580	0,0366	323

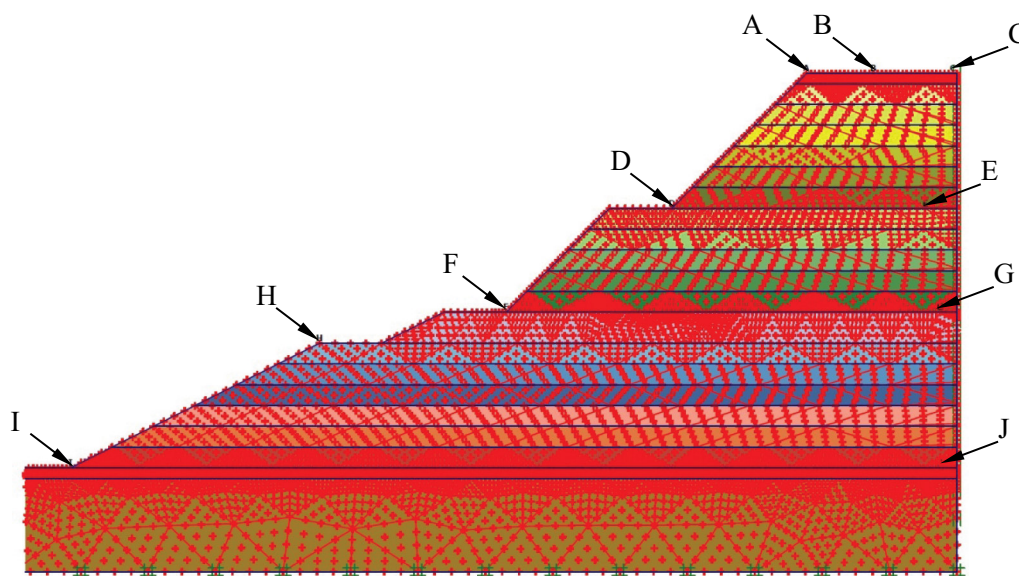


Рис. 2. Расчетные точки массива ТКО (фрагмент модели)

Fig. 2. Calculated points of municipal solid waste array (fragment of the model)

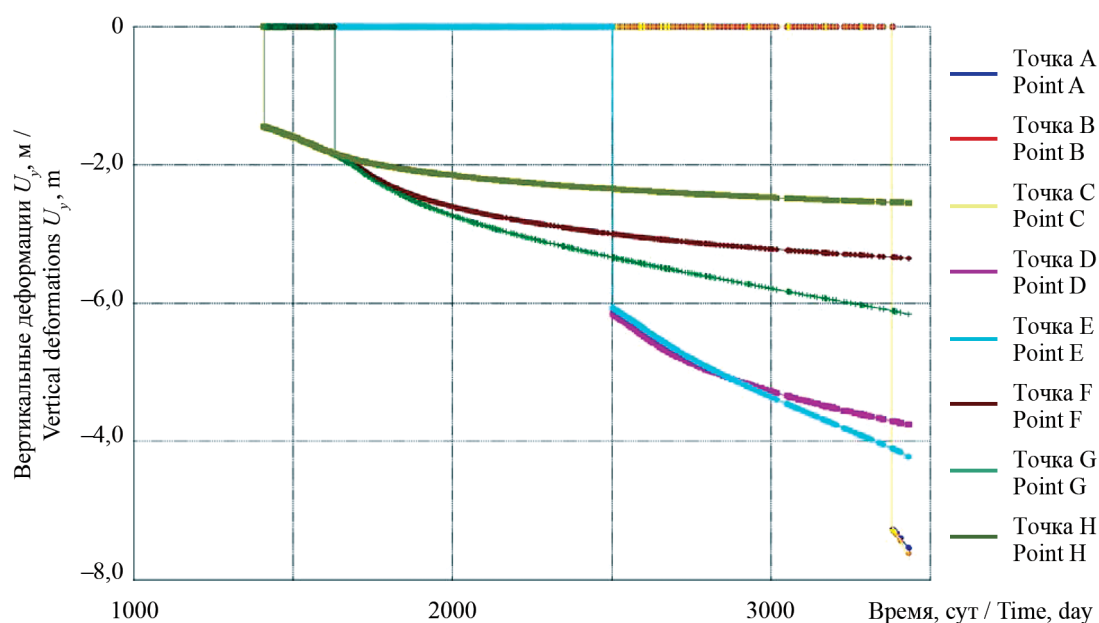


Рис. 3. Вертикальные деформации в процессе укладки массива отходов

Fig. 3. Vertical deformations in the process of laying waste mass

Например, для точки Н (6 слой, 1630 день от начала заполнения) расчетная осадка ранее уложенной толщи отходов составит 1,711 м. При полном заполнении всех 18 слоев полигона (3385 день от начала заполнения) осадка той же точки увеличится до 2,406 м. Для 7 слоя (точка F) осадка ранее уложенного массива отходов составит 2,229 м, при полном заполнении — 3,251 м, осадка же точки G, расположенной в центре полигона, при полном заполнении составит уже 4,08 м.

В 12 слое осадки точки D в подошве откоса при укладке — 4,459 м, при полном заполнении — 5,588 м; а для точки E — 4,443 и 6,102 м, соответственно. По верху полигона при заполнении 18 слоя за 103 дня (+50 дней на укладку покровного слоя суглинка) осадки различаются незначительно: для точки A — 7,315 и 7,586 м; для точки B — 7,349 и 7,684 м; а для точки C — 7,359 и 7,697 м. Расчетное состояние полигона после третьего этапа заполнения приведено на рис. 5.

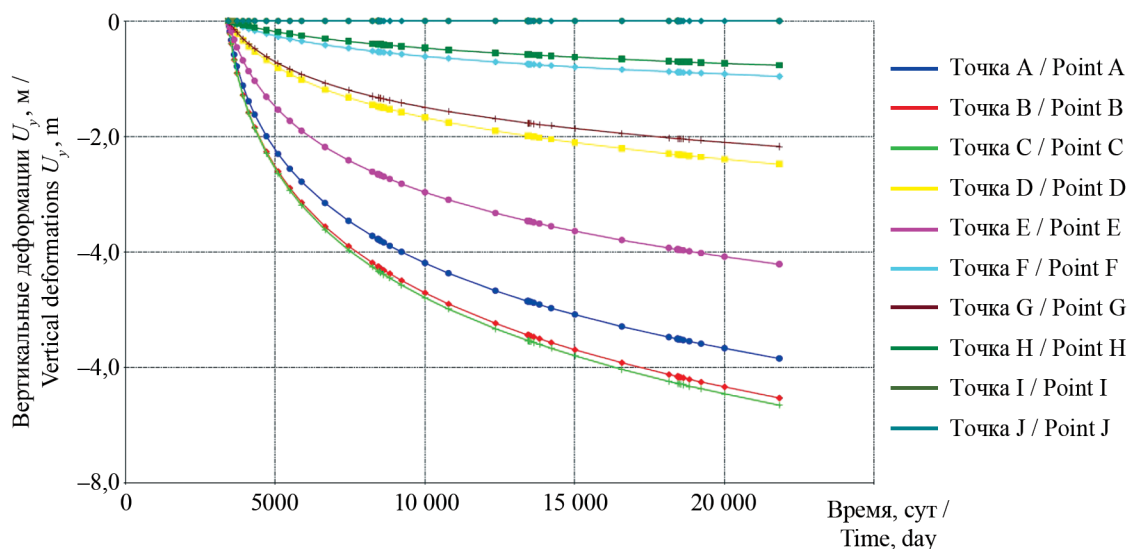


Рис. 4. Консолидация массива отходов после закрытия полигона

Fig. 4. Consolidation of waste mass after landfill closure

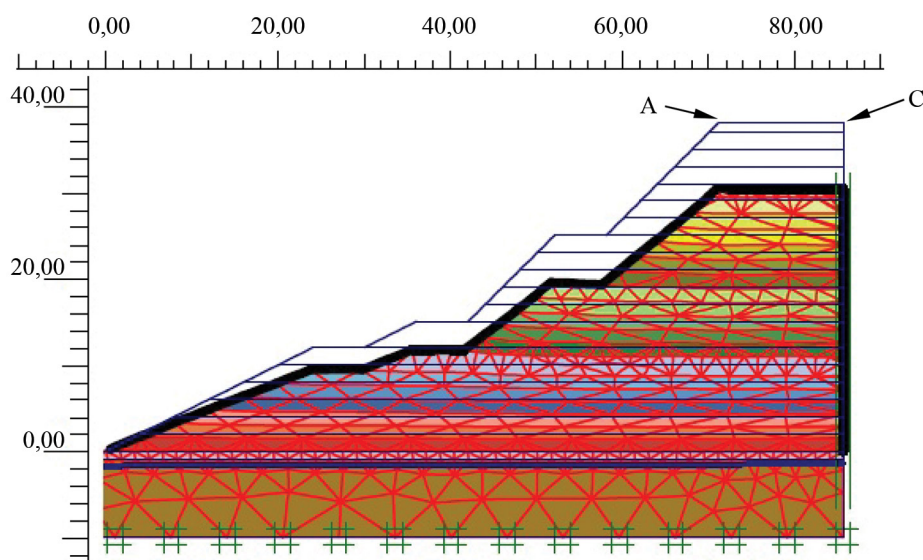


Рис. 5. Осадки массива ТКО после третьего этапа заполнения (Max 7,697 м)

Fig. 5. Settlement of waste massif after third stage of filling (Max 7.697 m)

В расчете применен прием, позволяющий представить реальную картину послойной осадки после полного заполнения. Для этого все перемещения после заполнения отходов и укладки покровного изолирующего слоя на 19 этапе обнуляются. Нулевой этап расчетов консолидации всего заполненного массива начинается «с нуля» (см. рис. 4). Через 18 400 дней консолидации осадка точки А увеличится на 6,127 м, точки В — на 6,822 м, а точки С — на 6,877 м. В уровне верха свалки разность осадок к окончанию расчета (18 400 дней от момента заполнения полигона) составит $14,574 - 13,713 = 0,861$ м при относительной разности осадок 0,059 (рис. 6).

Результаты расчета устойчивости массива отходов

После расчетов осадок был выполнен анализ устойчивости массива ТКО после отсыпки 1, 2 и 3 этапов, а также в процессе консолидации после закрытия полигона. Расчет производился в режиме снижения параметров прочности — тангенса угла внутреннего трения и удельного сцепления, до разрушения. Коэффициент устойчивости составил после отсыпки 1 этапа — 2,02, после 2 этапа — 1,64, после 3 этапа — 1,25. В процессе консолидации коэффициент устойчивости снизился до 1,24.

Механизмы разрушения откоса на разных этапах заполнения полигона представлены на рис. 7.

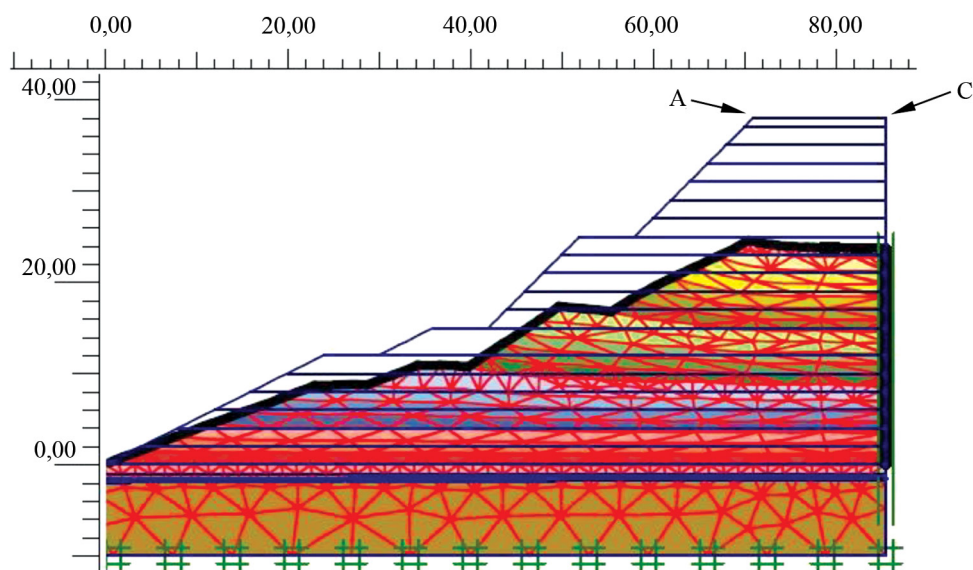


Рис. 6. Осадки массива ТКО через 18 400 дней после заполнения (Max 14,574 м)

Fig. 6. Settlement of municipal solid waste mass 18 400 days after filling

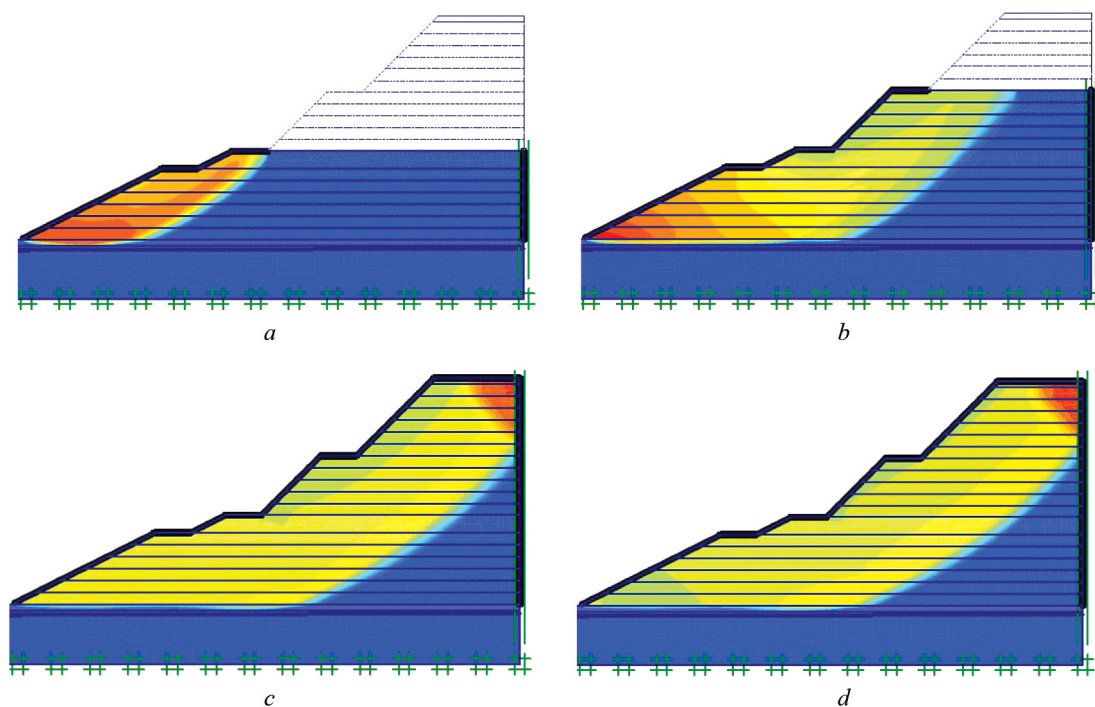


Рис. 7. Механизм разрушения откоса после окончания: *a* — первого этапа $K_{уст}$ 2,02; *b* — второго этапа $K_{уст}$ 1,64; *c* — третьего этапа $K_{уст}$ 1,25; *d* — консолидации 18 400 дн. $K_{уст}$ 1,24

Рис. 7. Slope failure mechanism after: *a* — the first stage of the F_s 2.02; *b* — the second stage of the F_s 1.64; *c* — the third stage of the F_s 1.25; *d* — consolidation of 18,400 days. F_s 1.24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов расчета осадок полигона ТКО

Анализ результатов расчета позволяет оценить дополнительную вместимость полигона к моменту

его окончательного заполнения (расчетная осадка точки А составит 7,586 м, а точки С — 7,697 м). Отметка точки А при укладке расчетного объема отходов 1 870 216 м³ (плотностью 850 кг/м³) будет 29,414; а точки С — 29,303. Поскольку полигон ожидаемо

будет заполняться до проектной отметки +37,000, то вместимость свалки только на этапе заполнения, без учета консолидации массива ТКО, после закрытия за расчетный срок 50,4 года (18 400 дней) увеличится на 19,5 % и составит 2 234 908 м³ (см. рис. 5), без учета осадки дополнительного объема отходов.

В результате консолидации отходов за 50 лет (18 400 дней) после закрытия полигона расчетная осадка точки А составит 13,713 м, а точки С — 14,574 м. В этом случае вместимость свалки увеличится на 31,2 % и составит 2 453 723 м³ (см. рис. 6).

Анализ устойчивости массива отходов

Полигон ТКО представляет собой массив уложенных послойно в насыпь на длительное хранение отходов, это — грунтоподобный материал, находящийся в нестабилизированном состоянии, разделенный прослойками из местного связного грунта. Нестабилизированное состояние отходов обуславливается процессами биологического разложения, сопровождающимися изменениями состава и свойств материала, слагающего насыпь, и недостаточным уплотнением мусора при его укладке на полигон. Рекомендации для оценки величины коэффициента устойчивости насыпи приведены в ТСН 12-304-04¹. Согласно ТСН 12-304-04, требуемый коэффициент устойчивости определяется по выражению (5):

$$K_{\text{тр}} = \frac{K_n \cdot n_c \cdot n_o}{m_o}, \quad (5)$$

где K_n — коэффициент надежности по назначению сооружения — для сооружения II категории 1,15;

¹ ТСН 12-304-04. Строительство объектов на склонах Пермской области. Пермь: ПГТУ, 2005. 46 с.

n_c — коэффициент сочетания нагрузок, примем равным 1; n_o — коэффициент перегрузки для насыпей, принимается 1,2; m_o — коэффициент условий работы, для пылевато-глинистых грунтов в стабилизированном состоянии — 0,9, в нестабилизированном состоянии — 0,85. По консервативным соображениям примем 0,85.

Требуемый коэффициент устойчивости по формуле (5) будет равен 1,63 для нестабилизированного состояния массива и 1,54 для стабилизированного состояния. С учетом вышеизложенного, после заполнения третьего этапа устойчивость полигона ТБО не обеспечена.

ВЫВОДЫ

Численное моделирование НДС массива ТКО с использованием модели слабого грунта с учетом ползучести позволяет учесть механизм биологической ползучести и спрогнозировать увеличение вместимости полигона за счет уплотнения отходов под нагрузкой при послойном заполнении хранилища.

Вместимость полигона депонирования за счет уплотнения отходов под действием собственного веса и в результате биологического разложения на этапе заполнения увеличилась на 19,5 %.

Анализ устойчивости массива ТКО дает возможность представить механизм разрушения и определить коэффициенты устойчивости на любом этапе заполнения полигона. По итогам расчетов устойчивость массива отходов на третьем этапе заполнения и после закрытия полигона недостаточна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhan T.L.T., Chen Y.M., Ling W.A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China // *Engineering Geology*. 2008. Vol. 97. Issue 3–4. Pp. 97–111. DOI: 10.1016/j.eng-geo.2007.11.006
2. Zekkos D., Fei X. Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear // *Waste Management*. 2017. Vol. 63. Pp. 380–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.029
3. Babu G.L.S., Chouksey S.K., Reddy K.R. Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis // *Waste Management*. 2013. Vol. 33. Issue 10. Pp. 2029–2034. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.018
4. Powrie W., Xu X., Richards D., Zhan L., Chen Y. Mechanism of settlement in municipal solid waste landfills // *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2019. Vol. 20. Issue 12. Pp. 927–947. DOI: 10.1631/jzus.A1900315
5. Ramaiah B.J., Ramana G.V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing // *Waste Management*. 2017. Vol. 63. Pp. 366–379. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.027.
6. Bareither C.A., Benson C.H., Rohlf E.M., Scalia IV J. Hydraulic and mechanical behavior of municipal solid waste and high-moisture waste mixtures // *Waste Management*. 2020. Vol. 105. Pp. 540–549. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.030
7. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Загорская Ю.М., Коротаев В.Н. Оценка состояния полигонов захоронения ТБО по изменению органической составляющей // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 7. С. 26–31. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-26-31
8. Reddy K.R., Hettiarachchi H., Gangathulasi J., Bogner J.E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation // *Waste*

Management. 2011. Vol. 31. Issue 11. Pp. 2275–2286. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.06.002

9. Ofrikhter V., Ofrikhter I., Bezgodov M. Results of field testing of municipal solid waste by combination of CPTU and MASW // Data in Brief. 2018. Vol. 19. Pp. 883–889. DOI: 10.1016/j.dib.2018.05.109

10. Yesiller N., Hanson J.L., Cox J.T., Noce D.E. Determination of specific gravity of municipal solid waste // Waste Management. 2014. Vol. 34. Issue 5. Pp. 848–858. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.02.002

11. Machado S.L., Carvalho M.F., Vilar O.M. Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior // Computers and Geotechnics. 2008. Vol. 35. Issue 5. Pp. 775–790. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.11.008

12. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression // Waste Management. 2010. Vol. 30. Issue 1. Pp. 11–22. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.005

13. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K., Kulkarni H.S. Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model // Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. 2010. Vol. 14. Issue 2. Pp. 139–150. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.00000024

14. Chen Y., Ke H., Fredlung D.G., Zhan L., Xie Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010. Vol. 136. Issue 5. Pp. 706–717. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000273

15. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K. Parametric study of MSW landfill settlement model // Waste Management. 2011. Vol. 31. Issue 6. Pp. 1222–1231. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.007

16. Оффрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Уточненная модель биоразложения твердых бытовых отходов //

Вестник гражданских инженеров. 2014. № 4 (45). С. 73–78.

17. Xu W., Gao W., Bian X., Chen Y. A practical approach for calculating the settlement and storage capacity of landfills based on the space and time discretization of the landfilling process // Waste Management. 2017. Vol. 69. Pp. 202–214. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.048

18. Оффрихтер В.Г., Оффрихтер Я.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния твердых бытовых отходов с использованием модели слабого грунта // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 82–92.

19. Gao W., Bian X., Xu W., Chen Y. An equivalent-time-lines model for municipal solid waste based on its compression characteristics // Waste Management. 2017. Vol. 68. Pp. 292–306. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.031

20. Brinkgreve R.B.J. Material models Plaxis 2D — Version 8. Rotterdam : A.A. Balkema, 2002. Pp. 6–20.

21. Bray J.D., Zekkos D., Kavazanjian E., Athanasopoulos G.A., Riemer M.F. Shear strength of municipal solid waste // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2009. Vol. 135. Issue 6. Pp. 709–722. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000063

22. Jessberger H.L., Kockel R. Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials // Proceedings of International Symposium «Green'93», Bolton, UK. 1993. Pp. 181–188.

23. Zekkos (Zeccos) D.P. Evaluation of static and dynamic properties of Municipal Solid Waste: dissertation doctor of philosophy. Berkeley, California : University of California, 2005. URL: <http://waste.geoengineer.org>

24. Murthy V.N.S. Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering: monograph. New York : Marcel Dekker, Inc., 2003. 1029 p.

Поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Вадим Григорьевич Оффрихтер — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства и геотехники; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; SPIN-код: 8191-1476, Scopus: 6507708259, ResearcherID: R-2457-2019, ORCID: 0000-0003-0803-2392; ofrikhter@mail.ru;

Галина Михайловна Батракова — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; SPIN-код: 8436-8873, Scopus: 55863441800; GMbatrakova@mail.ru;

Наталья Николаевна Слюсарь — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; SPIN-код: 6624-9670, Scopus: 56018223300; nnslyusar@mail.ru.

REFERENCES

1. Zhan T.L.T., Chen Y.M., Ling W.A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*. 2008; 97(3-4):97-111. DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.11.006
2. Zekkos D., Fei X. Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear. *Waste Management*. 2017; 63:380-392. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.029
3. Babu G.L.S., Chouksey S.K., Reddy K.R. Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis. *Waste Management*. 2013; 33(10):2029-2034. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.018
4. Powrie W., Xu X., Richards D., Zhan L., Chen Y. Mechanism of settlement in municipal solid waste landfills. *Journal of Zhejiang University-SCI-ENCE A*. 2019; 20(12):927-947. DOI: 10.1631/jzus. A1900315
5. Ramaiah B.J., Ramana G.V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. *Waste Management*. 2017; 63:366-379. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.027
6. Bareither C.A., Benson C.H., Rohlfs E.M., Scallia IV J. Hydraulic and mechanical behavior of municipal solid waste and high-moisture waste mixtures. *Waste Management*. 2020; 105:540-549. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.030
7. Zavizion I.U.V., Sliusar N.N., Glushankova I.S., Zagorskaya I.U.M., Korotaev V.N. Assessment of solid waste disposal areas by changes in the organic component. *Ecology and Industry of Russia*. 2015; 19(7):26-31. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-26-31 (rus.)
8. Reddy K.R., Hettiarachchi H., Gangathulasi J., Bogner J.E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. *Waste Management*. 2011; 31(11):2275-2286. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.06.002
9. Oftikhter V., Ofrikhter I., Bezgodov M. Results of field testing of municipal solid waste by combination of CPTU and MASW. *Data in Brief*. 2018; 19:883-889. DOI: 10.1016/j.dib.2018.05.109
10. Yesiller N., Hanson J.L., Cox J.T., Noce D.E. Determination of specific gravity of municipal solid waste. *Waste Management*. 2014; 34(5):848-858. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.02.002
11. Machado S.L., Carvalho M.F., Vilar O.M. Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior. *Computers and Geotechnics*. 2008; 35(5):775-790. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.11.008
12. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression. *Waste Management*. 2010; 30:11-22. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.005
13. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K., Kulkarni H.S. Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2010; 14(2):139-150. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024
14. Chen Y., Ke H., Fredlung D.G., Zhan L., Xie Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010; 136(5):706-717. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000273
15. Babu G.L.S., Reddy K.R., Chouksey S.K. Parametric study of MSW landfill settlement model. *Waste Management*. 2011; 31(6):1222-1231. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.007
16. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Improved model of biodegradation of municipal solid waste. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 4(45):73-78. (rus.).
17. Xu W., Gao W., Bian X., Chen Y. A practical approach for calculating the settlement and storage capacity of landfills based on the space and time discretization of the landfilling process. *Waste Management*. 2017; 69:202-214. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.048
18. Ofrikhter V.G., Ofrikhter I.V. Prediction of stress-strain state of municipal solid waste with application of soft soil creep model. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 9:82-92. (rus.).
19. Gao W., Bian X., Xu W., Chen Y. An equivalent-time-lines model for municipal solid waste based on its compression characteristics. *Waste management*. 2017; 68:292-306. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.031
20. Brinkgreve R.B.J. *Material models Plaxis 2D — Version 8*. Rotterdam, A.A. Balkema. 2002; 6-20.
21. Bray J.D., Zekkos D., Kavazanjian E., Athanasopoulos G.A., Riemer M.F. Shear strength of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009; 135 (6):709-722. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000063
22. Jessberger H.L., Kockel R. Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials. *Proceedings of International Symposium "Green '93"*, Bolton, UK. 1993; 181-188.
23. Zekkos (Zeccos) D.P. *Evaluation of static and dynamic properties of Municipal Solid Waste: dissertation doctor of philosophy*. Berkeley, California, University of California, 2005. URL: <http://waste.geoengineer.org>
24. Murthy V.N.S. *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering: monograph*. New York, Marcel Dekker, Inc., 2003; 1029.

Received March 16, 2020.

Adopted in a revised form on April 8, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Vadim G. Ofrikhter** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Construction operations and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 6149990, Russian Federation; SPIN-code: 8191-1476, Scopus: 6507708259, ResearcherID: R-2457-2019, ORCID: 0000-0003-0803-2392; ofrikhter@mail.ru;

Galina M. Batrakova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 6149990, Russian Federation; SPIN-code: 84363-8873, Scopus: 55863441800; Gmbatrakova@mail.ru;

Natalia N. Sliusar — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Protection; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 6149990, Russian Federation; SPIN-code: 6624-9670, Scopus: 56018223300; nnslyusar@mail.ru.

Разработка усовершенствованных моделей для расчета свай на несущую способность, осадку и надежность

В.С. Уткин, С.А. Соловьев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. От значений несущей способности свай и надежности в грунтах оснований зависит безопасность эксплуатации и долговечность свайных оснований и конструкций в целом. Ключевая проблема в расчетах свай заключается в достоверном определении значений ее несущей способности по всем критериям работоспособности первой и второй групп предельных состояний, в выявлении достоверных значений надежности (безопасности эксплуатации), экономической эффективности и рентабельности.

Материалы и методы. Одной из трудностей в выявлении значения несущей способности свай является определение значений сил трения-сцепления и их распределения на боковой поверхности сваи в грунте основания, когда нагруженная свая находится в неподвижном состоянии (в покое).

Результаты. Отсутствие достоверной информации о фактической силе трения-сцепления и, следовательно, о фактической несущей способности свай в условиях неподвижности не позволяет оценить ее качество с учетом обеспечения безотказной работы (надежности) в реальных условиях работы при заданной эксплуатационной нагрузке, невозможно спрогнозировать долговечность работы свай, обоснованно выбрать форму и размеры свай и т.д. Еще одна проблема в расчетах свай — определение значения осадки свай. Значение осадки свай в ряде случаев является важнейшим показателем работоспособности объекта.

Выводы. Предложены новые подходы к работе свай в грунте основания на базе методов расчетов надежности при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах. Совершенствование и развитие методов расчетов свай могут найти использование в расчетах щелевых фундаментов глубокого заложения, в расчетах опускных колодцев и кессонов, разработке новых нормативных документов по свайным основаниям; а также в учебном процессе вузов различной направленности и как источник для повышения квалификации специалистов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сваи, расчет надежности, осадка, свайные фундаменты, свайные сваи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Уткин В.С., Соловьев С.А. Разработка усовершенствованных моделей для расчета свай на несущую способность, осадку и надежность // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 789–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.789-823

Development of improved models for pile load bearing capacity, settlement and reliability analysis

Vladimir S. Utkin, Sergey A. Solovyev

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Safety of operation and durability of pile foundations and structures as a whole depend on the values of load bearing capacity of piles and reliability in the foundation soils. The key problem of pile analysis consists in reliable determination of its load bearing capacity values according to all performance criteria of the first and second groups of limit states, in revealing of reliable values of reliability (operation safety), economic efficiency and profitability.

Materials and methods. One of the difficulties in detecting the value of the load bearing capacity of friction piles is to determine the values of friction and cohesive forces and their distribution over the side surface of the pile in the foundation soil when the loaded pile is immobilized (at rest).

Results. Absence of reliable information on actual friction and cohesive force and, consequently, on actual load bearing capacity of a pile in the conditions of immobility does not allow to estimate its quality taking into account assurance of trouble-free operation (reliability) in real operating conditions at the pre-set operating load, it is impossible to predict the durability of a pile, to make a reasonable choice of pile shape and dimensions, etc. Another pile analysis problem is determining the value of pile settlement. The value of pile settlement is in some cases the most important indicator of the facility performance.

Conclusions. New approaches to the operation of piles in the foundation soil on the basis of modern methods of reliability calculations with limited statistical information about controlled parameters are proposed. Improvement and development of pile calculation methods can be found in the calculation of deep trencher foundations, in the calculation of open caissons and caissons, the development of new statutory documents on pile foundations; as well as during training process of various universities and as a source for advanced training of specialists.

KEYWORDS: piles, reliability analysis, settlement, pile foundations, friction piles

FOR CITATION: Utkin V.S., Solovyev S.A. Development of improved models for pile load bearing capacity, settlement and reliability analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):789-823. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.789-823 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Отдельные сваи и свайные фундаменты являются ключевыми несущими элементами, обеспечивающими эффективное и безопасное функционирование объектов различного назначения. Они должны отвечать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» (с изм. от 25.07.2019) и других нормативных документов. От обоснованного выбора конструкции и материала сваи, построенного на достоверной исходной информации о работе сваи в грунте основания и на адекватной теории расчета, зависит безопасность эксплуатации объекта, стоимость сооружения и его эксплуатационная долговечность. Применение свай в строительстве для передачи нагрузки от различных по назначению объектов на грунты общеизвестно. В зависимости от их назначения в конкретных условиях разработаны сваи по видам конструкций, материалам, размерам; разработаны методы их расчетов, способы погружения в грунт, правила эксплуатации. В то же время существует ряд проблем в обоснованности их работы в грунтах оснований, в методах их расчетов, в определении эффективной длины сваи, эффективном использовании несущей способности грунтов оснований, в расчетах значений надежности, долговечности и т.д. Так, например, несущая способность свай по несущей способности грунта основания по СП 24.13330.2011 определяется по результатам расчетов с использованием расчетных значений сопротивления по боковой поверхности сваи f , а фактически сил трения-сцепления сваи при ее срыве (движении). Принято возрастание сил трения-сцепления на поверхности сваи вплоть до нижнего конца, с учетом повышения значений прочности грунта основания, т.е. к нижнему концу сваи. Понимая, что свая в грунте основания не должна «срываться», полученную нагрузку на сваю при ее «срыве» уменьшают путем введения коэффициентов условий работы, без теоретического обоснования их значений для различных геологических и конструктивных условий.

На рис. 1 представлена расчетная схема свай в грунте основания при центральном сжатии. Такой же вид расчетной схемы используется при центральном растяжении. Длина сваи H принимается для предельной нагрузки F_d такой, чтобы на нижнем конце сваи возникало расчетное сопротивление грунта R . Для расчетов сваи в СП 24.13330.2011 приведены таблицы со значениями f_i и R_i в зависимости от вида грунта и глубины погружения сваи. Предельная нагрузка на сваю по СП определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{cr} RA + u \sum_{i=1}^n \gamma_{cf} f_i h_i \right),$$

где R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи; f_i — расчетные сопротивления на боковой поверхности сваи в месте контакта со слоями грунта высотой h_i или расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи; $\gamma_c, \gamma_{cr}, \gamma_{cf}$ — коэффициенты условий работы.

Поставленные вопросы по несущей способности свай при сжатии относятся и к сваям, работающим на выдергивание (на растяжение).

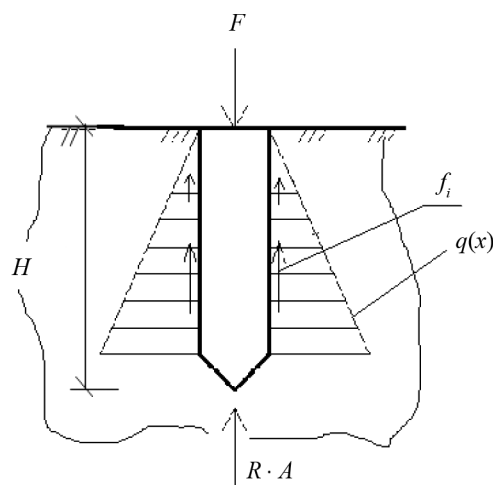


Рис. 1. Расчетная схема работы свай в грунте основания по СП 24.13330.2011

Fig. 1. Design diagram of friction piles in the foundation soil on the basis of SP (Code of Rules) 24.13330.2011

Силы f на поверхности сваи-стойки от действия сжимающей силы F и давления грунта RA на нижнем участке сваи в расчетах свай-стоек не учитываются. Несущая способность сваи-стойки определяется по формуле $F_d = \gamma_c RA$. В некоторых случаях (большая прочность грунта выше скального, большая длина сваи) учет несущей способности надскального грунта повысит несущую способность сваи-стойки.

Общая проблема научного обзора темы заключается в выявлении более достоверной работы свай в грунте основания и на этой основе формировании новых методов расчета свай по несущей способности грунта основания и по осадке, а на их базе формировании методов расчета надежности свай. Учитывая новые подходы к описанию работы свай в грунте и их расчеты, можно выявить эффективные сваи по конструкции, размеру и материалу. По поставленной проблеме в мировой практике в последнее время проведены теоретические и экспериментальные исследования в РФ и за рубежом, намечились определенные тенденции и новые под-

ходы в реализации совершенствования методов расчета свай всех видов по несущей способности, осадке и надежности.

Так, в работах [1–7] выявлена природа возникновения сил трения-сцепления на поверхности свай в грунтах под нагрузкой при их сжатии или растяжении в состоянии покоя. Причина возникновения сил трения-сцепления на поверхности свай заключается в микроперемещениях слоев материала сваи в грунтовой среде. Микроперемещения в поверхностных слоях сваи вызываются деформациями материала сваи от сжимающей или растягивающей нагрузки на сваю. Эти микроперемещения в грунтовой среде вызывают взаимные воздействия материала сваи и грунта и силы взаимодействия сваи с грунтом. При определенном значении этих сил, свая находится в равновесии и механического перемещения ее как целого тела в грунте не наблюдается, а приведенные в СП 24.13330.2011 значения расчетных сопротивлений в табл. 7.3 не могут быть использованы в расчетах свай, так как они получены при срыве сваи от «предельной нагрузки».

В последнее время появились работы, направленные на выявление значений фактического распределения сил f на поверхности сваи в грунте, на выявление и учет отрицательных сил трения-сцепления на нижнем конце сваи. В труде [8] они называются касательными силами, в публикации [9] касательными напряжениями, в [10–12] силами трения-сцепления.

Фактически, эти силы носят сложный характер и зависят от вида грунта и его напряженно-деформированного состояния (НДС), материала сваи и качества его на поверхности сваи, интенсивности бокового давления грунта на поверхность сваи, соответственно от глубины расположения участка сваи и грунта, направления микроперемещений (деформаций) материала сваи относительно грунта и т.д. В настоящее время не существует теоретических методов определения сил трения для тел, находящихся в покое без механического движения. Значения сил взаимодействия между свай и грунтом на поверхности сваи можно определить только по результатам испытаний пробных свай. Если свая не нагружена (собственный вес пока не учитываем), то силы трения-сцепления равны нулю. При нагружении сваи сжимающей нагрузкой в грунте основания возникают микроперемещения верхних слоев материала сваи в грунте, и грунт реагирует на эти перемещения в виде сопротивления им. В результате появляются силы трения-сцепления. В трудах [10–12] значение этих сил описывают формулой:

$$f(x) = \varepsilon(x)q(x)\phi,$$

где $\varepsilon(x)$ — функция распределения относительной деформации материала сваи по ее длине; $q(x)$ — функция бокового давления грунта на сваю; ϕ — коэффициент, учитывающий взаимодействие сваи

с грунтом основания, свойства материала сваи, грунта основания, размеры сваи и ее форму, и т.д., и определяемый по результатам испытаний пробных свай. На рис. 2 приведена расчетная схема висячей сваи в грунте основания от сжимающей нагрузки F , где показаны отрицательные силы трения на нижнем конце сваи от деформаций материала сваи, вызванных сжимающей силой (реакцией) $\sigma_{гр} A$.

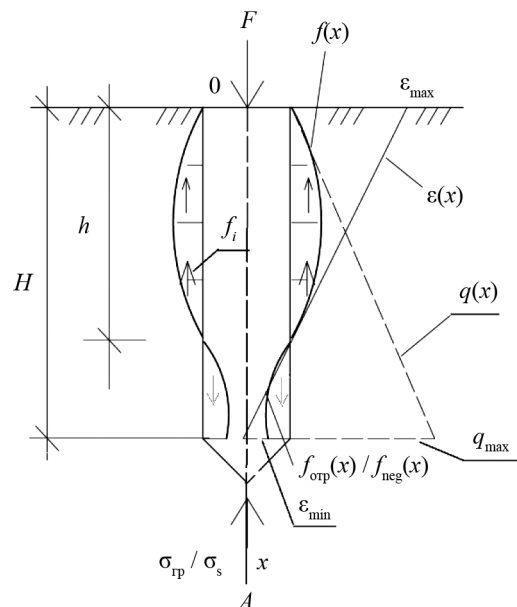


Рис. 2. Расчетная схема работы сваи в грунте основания; $\sigma_{гр}$ — напряжения в грунте под нижним концом сваи; $f_{отр}(x)$ — отрицательные силы трения-сцепления; A — площадь поперечного сечения сваи

Fig. 2. Design diagram of pile behavior in the foundation soil; σ_s — soil stresses below the bottom end of the pile; $f_{neg}(x)$ — negative friction and cohesive forces; A — pile cross-section area

В работе [13] рассматривается снижение несущей способности висячей сваи вследствие снижения сил трения-сцепления по боковой поверхности и деградации свойств материалов сваи в контакте с грунтом основания. Также предложены новые математические модели для описания работы сваи вследствие деградации ее материала.

Китайские ученые [14] исследовали несущую способность буронабивной висячей сваи с учетом того, что при бурении на дне скважины скопился мусор от бурения и реакция от конца сваи не может быть передана равномерно. Отмечается доминирующая роль сил трения по боковой поверхности.

В работе [15] предлагается подход к оценке сил трения-сцепления по боковой поверхности сваи на основе функции Грина.

Публикация [16] также посвящена исследованиям вопросов возникновения и распределения сил трения-сцепления по боковой поверхности свай.

В расчетах свай-стоек несущая способность грунта, расположенного выше скального, не учитывается в работе сваи при любой его высоте, и расчет несущей способности сваи-стойки по СП 24.13330.2011 проводится по формуле:

$$F_d = RA,$$

где R — расчетное сопротивление скального грунта под нижним концом сваи; A — площадь поперечного сечения сваи.

В соответствии с отмеченным, можно сделать некоторые замечания о расчетах свай-стоек. Во-первых, при большой длине сваи и большой прочности надскального грунта, даже при отсутствии движения сваи-стойки возможно в расчетах сваи использовать существующий резерв несущей способности сваи за счет учета несущей способности грунта. Во-вторых, можно предположить возникновение отрицательных сил трения-сцепления в нижней части сваи, направленных вниз на поверхности нижней части сваи. В-третьих, при большой длине сваи-стойки и деформации ее от сжатия осадка сваи может достигать опасных значений для некоторых конструкций.

В последнее время повышается применение буроинъекционных и буронабивных свай с уширением [17], в которых обосновывается повышение эффективности устройства уширений не только на нижнем конце сваи, но и в ее средней части. При этом расчетная схема работы свай-стоек принята в соответствии с указаниями СП 24.13330.2011, как показано на рис. 1, т.е. для сваи, работающей по схеме «срыва» в грунте основания. В действительности свая работает по схеме и при $h < H$ (см. рис. 2) уширение в нижнем конце сваи может ока-

заться бессмысленным, если вся нагрузка на нее полностью воспринимается силами трения-сцепления f по боковой поверхности сваи. Кроме этого, в последнем случае возникает искусственно, за счет уширения увеличивается реакция на нижнем конце сваи и формируется отрицательная сила трения-сцепления, снижающая несущую способность сваи. В расчетах свай отрицательные силы трения-сцепления не учитываются в настоящее время.

На рис. 3 показано, в каких случаях уширение в сваях бесполезно, а с точки зрения их стоимости — вредно.

Если все же устраивать уширение в свае, то оно должно располагаться выше от нижнего сечения, где $f(x)$ становится равным нулю.

Остановимся на некоторых вопросах работы и расчетов свай-стоек. На рис. 4 приведена расчетная схема сваи-стойки по СП 24.13330.2011.

Расчет сваи-стойки заключается в определении предельной нагрузки по критерию прочности грунта и проверке прочности ее материала. Однако с учетом замечаний о наличии сил трения-сцепления на поверхности сваи и их представлении на рис. 2, требуется уточнение расчетной схемы сваи по рис. 4, особенно при достаточно высокой прочности надскального грунта и большой длине сваи-стойки на высоте сваи $h < H$ возникают силы трения-сцепления $f(x)$, направленные вверх, а на участке ниже H такие же силы трения сцепления $f_{\text{отр}}(x)$ будут направлены вниз и являются вредными. Для повышения несущей способности сваи-стойки было бы полезным защитить нижнюю часть сваи от прямого контакта с грунтом основания, что найдет отражение в основной части обзорного научного труда.

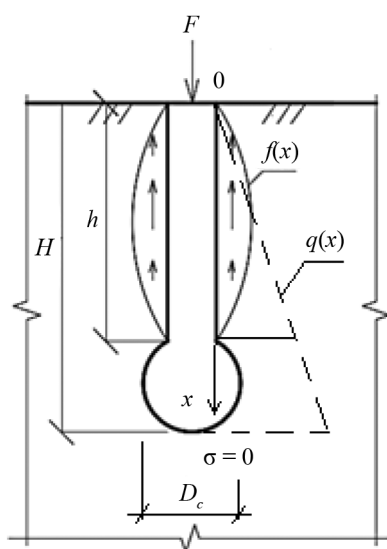


Рис. 3. Расчетная схема буроинъекционной сваи с уширением в грунте основания

Fig. 3. Design diagram of under-ream pile broadened in foundation soil

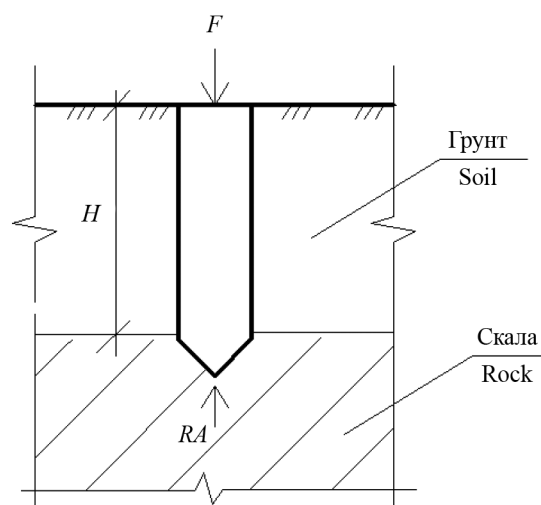


Рис. 4. Расчетная схема сваи-стойки

Fig. 4. Design scheme of end-bearing pile

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет несущей способности висячих свай по несущей способности материала, несущей способности грунта основания и осадке

Расчет несущей способности висячих свай по несущей способности материала сваи

Рассмотрим определение размеров поперечного сечения сваи по критерию прочности материала сваи при действии на нее центральной сжимающей силы, равной предельной нагрузке, предварительное значение которой определяется из условия $F_d = kF_p$, где k — коэффициент запаса; F_p — расчетное значение нагрузки. Наибольшее воздействие F_d свая будет испытывать на уровне нижней грани ростверка, так как в грунте основания часть нагрузки от F_d переходит на грунт основания.

Для определенности обсуждения поставленного вопроса рассмотрим совершенствование работы железобетонной сваи квадратного сечения из бетона известного класса и стальной арматуры. Согласно [18] и СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», значение предельной нагрузки (меры несущей способности) по критерию прочности материала сваи определяется по формуле $F_d = \gamma_b R_b A_b + R_s A_s$. Значение параметров можно найти в СП. В таком виде формула не соответствует действительной работе железобетонной сваи при сжатии, поэтому предлагается усовершенствование метода расчета железобетонной сваи. По гипотезе плоских сечений в железобетонных конструкциях [19] без трещин деформации бетона ε_b и деформации арматуры ε_s одинаковые, т.е. $\varepsilon_b = \varepsilon_s$. Учитывая, что предельная деформация для стальной арматуры принята по СП 63.13330.2012 $\varepsilon_s = 0,25 \cdot 10^{-2}$, что соответствует условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ стали арматуры, а предельная деформация бетона по СП 63.13330.2012 равна $\varepsilon_b = 0,34 \cdot 10^{-2}$ при относительной влажности окружающей среды, равной 40–75 %, то расчет железобетонной сваи следует вести по предельной деформации стали арматуры ε_s . При этом несущая способность бетона по значениям деформаций будет недоиспользована, т.е. предельное состояние арматуры не предшествует разрушению бетона. Формула для определения значения F_d примет вид (без коэффициентов надежности, которые в дальнейших расчетах заимствуются из СП 24.13330.2011):

$$F_d = \varepsilon_s E_b A_b + \varepsilon_s E_s A_s, \quad (1)$$

где A_b , A_s — площади поперечных сечений бетона и стальной арматуры; E_b , E_s — модули упругости бетона и стальной арматуры.

Условие прочности железобетонной сваи с учетом значения расчетной нагрузки $F_p = KF_{эк}$ и выражения (1) представим в виде:

$$KF_{эк} \leq \varepsilon_s E_b A_b + \varepsilon_s E_s A_s, \quad (2)$$

где K — коэффициент запаса. Так как $\varepsilon_b = \varepsilon_s < \varepsilon_{b,пр} = 0,34 \cdot 10^{-2}$, то для бетона принимается начальный

модуль упругости E_{b0} , соответствующий деформации бетона в свае $\varepsilon_b = 0,2 \cdot 10^{-2}$. Значения диаметра продольных стержней арматуры задаются. Бетон используется, как правило, класса В20. Число стержней для прямоугольного поперечного сечения сваи принимается равным четырем. Из формулы (2) находят значение A_b — площадь бетона и размеры поперечного сечения сваи.

Расчет несущей способности висячих свай по несущей способности грунта основания

Силы расчетного сопротивления f , используемые в формулах СП 24.13330.2011 и имеющие место на поверхности сваи, находящейся в грунте основания в покое, возникают в результате микроперемещений поверхностных слоев материала сваи относительно грунта основания, а микроперемещения вызываются деформацией материала сваи при ее сжатии нагрузкой от фундамента. В работе [9] было установлено, что «в результате натурных испытаний длинных буронабивных свай... существенное влияние оказывает сжимаемость материала сваи», т.е. деформация материала сваи. Также в [9] отмечено: «Очевидно, что при определенном соотношении длины сваи к диаметру l/d и свойств грунтов, окружающих сваю и под ее нижним концом, может возникнуть ситуация, когда несущая способность грунтов нижнего слоя под нижним концом сваи будет реализована не полностью». Наши испытания моделей в лабораторных условиях в виде тонкостенных труб и резиновых образцов при сжатии в грунте также выявили роль деформаций материалов моделей на значение и распределение сил трения-сцепления на их несущую способность при сжатии в грунте.

На поверхности сваи в результате деформаций $\varepsilon(x)$ ее материала от сжимающей нагрузки возникают микроперемещения поверхностных слоев сваи относительно грунта. Эти перемещения приводят к образованию сил трения-сцепления по поверхности сваи при наличии бокового давления $q(x)$ грунта на поверхность сваи. При этом деформации материала сваи убывают от верхнего конца сваи к нижнему за счет постепенной передачи сжимающей нагрузки от сваи на грунт, а боковое давление грунта на сваю, наоборот, возрастает к нижнему концу от значения, равного нулю на верхнем конце сваи (на границе пересечения поверхности грунта со сваем, где $q = 0$). В результате силы трения-сцепления f , зависящие от $\varepsilon(x)$ и $q(x)$, на поверхности сваи начинаются с нуля, достигают максимума и на некоторой глубине h заканчиваются нулевым значением, где деформации материала сваи равны нулю. Ниже этой глубины нагрузка на сваю от фундамента (ростверка) не передается, так как она полностью воспринимается верхней частью сваи с рабочей высотой h , что показано на расчетной схеме работы сваи в грунте основания фундамента на рис. 5 при центральном нагружении. В этом случае на нижнем

конце сваи не возникает давления грунта (реакции) на сваю, что свидетельствует о неэффективности использования несущей способности грунта основания под нижним концом сваи. По СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» отмечается, что в среднем 30–40 % нагрузки в висячих сваях передается на грунт нижним концом сваи, а 60–70 % — боковой поверхностью сваи. Следовательно, пренебрегать работой сваи в основании в нижнем ее конце нельзя для ее эффективного использования. Ниже определенного сечения, как показано на рис. 5, свая не работает и является излишней, что влияет на ее стоимость. Если длину сваи H ограничить значением h_0 , то в этом случае на нижнем конце сваи не возникнет реакция, т.е. $RA = 0$, и несущая составляющая сваи в выражении (1) в виде RA не будет реализована. Для возникновения реакции на нижнем конце сваи нагрузка F должна возрастать или при постоянной нагрузке должна уменьшаться длина сваи, что ведет к уменьшению значения h_0 , но к увеличению отрицательных сил трения, как будет показано на рис. 6.

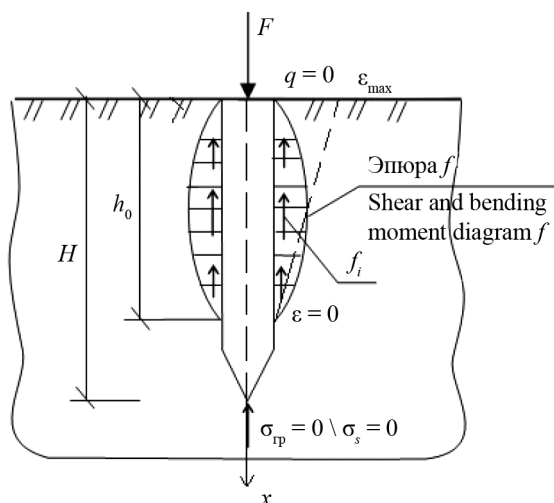


Рис. 5. Расчетная схема работы висячей сваи в грунте основания фундамента и условная эпюра сил трения-сцепления f при $F < F_p$

Fig. 5. Design diagram of a friction piles operation in the foundation soil and the shear and bending moment diagram of friction and cohesive forces f at $F < F_p$

Висячую сваю будем считать эффективной по длине $H_{эф}$ при выполнении условия:

$$\frac{F_d - F_p}{F_d} 100 \% \leq 5 \%,$$

где F_d — несущая способность сваи, определяемая по несущей способности грунта основания; F_p — расчетная нагрузка на сваю от фундамента и надфундаментной конструкции, определяемая на стадии проектирования сооружения. Возможны и другие значения количественной оценки эффективности длины сваи.

В работах [20–25] приведены другие подходы к определению эффективной длины сваи.

Для выполнения приведенного условия и определения эффективной длины сваи с полной реализацией несущей способности грунта по боковой поверхности и под нижним концом сваи предлагается предварительно проводить испытание пробной сваи на статическое нагружение по расчетной схеме на рис. 6, с вычислением и измерением деформаций материала сваи по ее длине. Для этого изготавливается пробная свая завышенной длины или, при необходимости, что выясняется в процессе статического нагружения, длина сваи наращивается (стальная или деревянная). Ордината эпюры деформаций материала сваи на уровне поверхности грунта, например для железобетонной сваи, определяется измерениями деформаций бетона методом тензометрирования и для контроля расчетом по формуле:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{F_p}{A_b E_b + A_s E_s},$$

где F_p — расчетная нагрузка на сваю, определяемая на стадии проектирования расчетом надфундаментной конструкции с учетом веса сваи (приблизительно); A_b , A_s — площадь бетона и арматуры поперечного сечения сваи.

Определение значений деформаций материала сваи ниже верхнего ее конца и напряжения в грунте под нижним концом сваи осуществляется инструментальными методами.

Как было отмечено выше, эффективность использования висячей сваи при расчетной нагрузке F_p по несущей способности грунта в свайном основании определяется в сравнении нагрузки F_p с предельной нагрузкой $F_{пр}$ на сваю, равной ее несущей способности F_d по грунту основания, по расчетной схеме, показанной на рис. 6. Теоретическое обоснование определения эффективной длины сваи $H_{эф}$ рассмотрим по рис. 6, расчетная схема которой построена на основании результатов испытаний пробной висячей сваи нагрузкой, равной $F_{пр}$, получаемой по результатам измерений относительных деформаций на нижнем конце сваи методом тензометрирования с доведением реакции до расчетного сопротивления грунта основания, $\varepsilon E = R$.

Предельная нагрузка на эффективную сваю в однородном грунте основания равна:

$$F_{пр} = \gamma_c \left(RA + u \int_0^h f(x) dx - u \int_h^{H_{эф}} f_{отр}(x) dx \right), \quad (3)$$

где $f(x)$ — функция «положительных» сил трения-сцепления; $f_{отр}(x)$ — функция отрицательных сил трения-сцепления (при $x = h$ и $f(h) = 0$); R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, значение которого зависит от $H_{эф}$; γ_c — коэффициент условий работы по СП 24.13330.2011; u — периметр поперечного сечения сваи.

Перспективным является изоляция нижней части сваи от грунта основания для недопущения появления отрицательных сил трения-сцепления, как показано на рис. 7.

Значение эффективной длины сваи $H_{эф}$ найдем из выражения (3), принимая $F_p = F_{пр}$. В неоднородных грунтах по слоям $f(x)$ представляет кусочно-непрерывную функцию. В многослойных основаниях фундаментов возможно $f(x)$ представить одной приближенной функцией, используя для этого обработку результатов измерения деформаций в нескольких поперечных сечениях сваи на длине, например методом наименьших квадратов. На первом этапе исследований ограничимся основаниями фундаментов с однородным (однослойным) грунтом.

Примем для обоих участков длины сваи описание силы трения-сцепления непрерывной функцией $f(x)$, как показано на рис. 6, вида:

$$f(x) = \varepsilon(x)q(x)\phi, \quad (4)$$

где $\varepsilon(x)$ — функция изменения деформации материала сваи является непрерывной по ее длине (с началом координат в месте пересечения сваи с поверхностью грунта), вид которой выявляется по результатам измерения деформации $\varepsilon(x)$ материала по длине сваи в сечениях на расстоянии 0,8–1,0 м. В качестве примера в работе [26] описана методика экспериментального измерения и определения деформаций материала сваи. В нижнем конце эффективной сваи имеем $\varepsilon_{\min} = R(H_{эф})/E$, где E — мо-

дуль упругости материала сваи. Для железобетонной сваи, состоящей из бетона с модулем упругости E_b и стальной арматуры с E_s с учетом одинаковой деформации, вследствие гипотезы плоских сечений имеем:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{R(H_{эф})A}{E_b A_b + E_s A_s},$$

где A — площадь поперечного сечения сваи, $R(H_{эф})$ — расчетное сопротивление грунта основания на глубине $H_{эф}$. При наличии функциональной зависимости $R(x)$ — расчетного сопротивления грунта основания от глубины погружения сваи по СП 24.13330.2011, значение R можно выразить через значение $H_{эф}$. Следовательно, и $\varepsilon_{\min}$ будет зависеть от значения $H_{эф}$.

Обрабатывая математически табличные данные значений R , приведенных в табл. 7.2 СП 24.13330.2011, нами получены зависимости расчетных сопротивлений различных грунтов основания от погружения нижнего конца сваи в грунт H . Так, для мелких песков средней плотности имеем:

$$R(H) = 1850 + 69,5 \cdot H, \text{ (в кПа для } H > 3 \text{ м);}$$

для глинистых грунтов при показателе текучести $I_L = 0,2$:

$$R(H) = 3001 + 170 \cdot H, \text{ (в кПа для } H > 3 \text{ м).}$$

В общем виде для всех грунтов, приведенных в табл. 7.2. СП, функциональную зависимость R от x или при $x = H$ можно представить в виде:

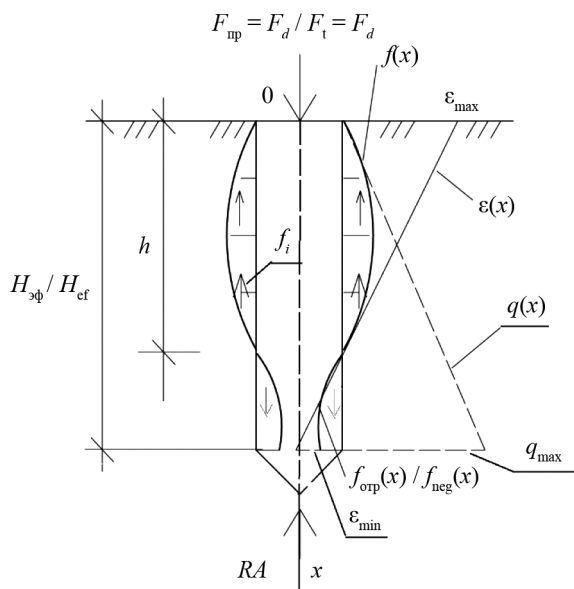


Рис. 6. Расчетная схема работы свай в грунте основания при эффективной длине $H_{эф}$ сваи. Силы трения-сцепления $f(x)$ — положительные; $f_{opr}(x)$ — отрицательные

Fig. 6. Design diagram of a friction piles in the foundation soil at the effective length of the pile H_{ef} . Friction and cohesive forces $f(x)$ — positive; $f_{neg}(x)$ — negative

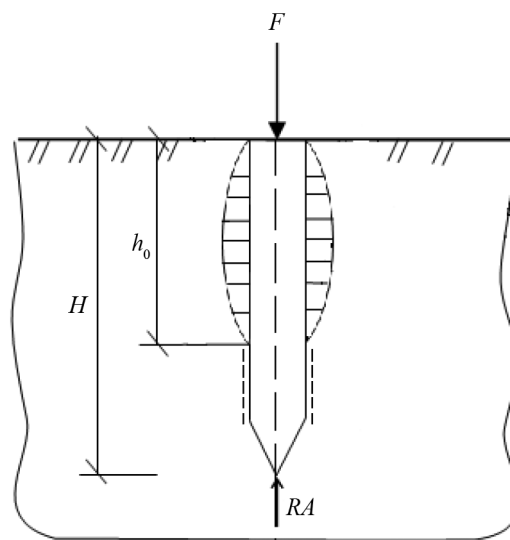


Рис. 7. Висячая свая с изоляцией от отрицательных сил трения-сцепления

Fig. 7. Friction piles insulated from negative friction and cohesive forces

$R(H) = a + b \cdot H$, где a и b — значения коэффициентов, зависящие от вида грунтов, приведенных в табл. 7.2 СП.

По формуле (4) силы трения-сцепления $f(x)$ зависят от значений бокового давления грунта на поверхность сваи. Согласно [27], $q(x) = \xi_0 \gamma x$, где γ — усредненный объемный вес грунта основания;

$\xi_0 = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}$, μ_0 — коэффициент относительной поперечной деформации грунта, аналогичный коэффициенту Пуассона (по [27] для глин и суглинков (твердых и полутвердых), $\mu_0 = 0,10/0,15$, тугопластичных $\mu_0 = 0,20/0,25$, пластичных и текучепластичных $\mu_0 = 0,30/0,40$, для песков $\mu_0 = 0,20/0,25$).

Боковое давление грунта на сваю можно определить приближенно по североамериканским строительным нормам ASTM (American Society for Testing and Materials) по формуле $q(x) = K_a \gamma x$, где K_a — коэффициент активного давления грунта, значение которого находится по таблицам [10–12] в зависимости от типа грунта. При $x = 0$ имеем $q = 0$ и, следовательно, $f = 0$ на уровне пересечения сваи с поверхностью грунтового основания.

По выражению (2) $f(x)$ зависит от коэффициента ϕ , определяемого из результатов испытаний пробной сваи по схеме рис. 4.2 для принятого по проекту свайного основания, (информация об определении ϕ будет приведена ниже).

Для упрощения и сокращения объемов испытаний пробной сваи, обработки результатов измерений и использования уравнения (3) для выявления эффективной длины сваи примем в первом приближении изменение деформаций материала сваи по прямой, проходящей через две заданные точки ($x_1 = 0, y_1 = \varepsilon_{\max}$) и ($x_2 = H_{\text{эф}}, y_2 = \varepsilon_{\min}$), как показано на рис. 6. Из рис. 7 видно, что:

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}} = \frac{H_{\text{эф}}}{H_{\text{эф}} - h_0}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\max} = \frac{F_p}{E_b A_b + E_s A_s}$. Деформация $\varepsilon_{\max}$ вычисляется при известных значениях всех параметров. Значение h_0 выявляется из испытаний пробной сваи. Деформация на нижнем конце сваи выражается через неизвестную реакцию RA . Значение расчетного сопротивления грунта R неизвестно, но его можно выразить через глубину погружения нижнего конца сваи в виде функции $R(H)$, как отмечено выше.

В результате имеем $\varepsilon_{\min} = \frac{(a + bH_{\text{эф}})A}{E_b A_b + E_s A_s}$. После подстановки выражений всех параметров в (5) получим:

$$\frac{F_p}{A} = \frac{H_{\text{эф}}}{H_{\text{эф}} - h_0} (a + bH_{\text{эф}}), \quad (6)$$

где $A = A_s + A_b$.

Из выражения (6) определяется эффективная длина сваи $H_{\text{эф}}$ при измеренном значении h_0 на пробной свае.

Пример 1. Висячая железобетонная забивная свая (прочность сваи обеспечена) квадратного поперечного сечения $0,3 \times 0,3$ м²; грунт однородный (мелкий песок $R(H) = 1,850 \cdot 10^6 + 6,956 \cdot 10^4 \cdot H$); $\gamma_c = 1$. Расчетная нагрузка $F_p = 900$ кН. Модуль упругости бетона $E_b = 20 \cdot 10^9$ Па; арматуры $E_s = 2 \cdot 10^{11}$ Па; арматура — 4 стержня $d = 12$ мм ($4,52 \cdot 10^{-4}$ м²). Условно по результатам испытаний пробной сваи получено $h_0 = 11,5$ м.

Решение: из $\varepsilon_{\max} = \frac{F_p}{E_b A_b + E_s A_s}$ имеем

$\varepsilon_{\max} = 0,0005$. Подставляя исходные данные в (6)

$\frac{F_p}{A} = \frac{h_0}{H_{\text{эф}} - h_0} (a + bH_{\text{эф}})$, в результате вычислений,

имеем: $H_{\text{эф}} = 14,81$ м. Принимаем $H_{\text{эф}} = 15$ м.

Пример 2. Решим пример 1 методом СП 24.

13330.2011 по формуле $F_d = \gamma_c \left(RA + u \sum_{i=1}^n f_i(x) h_i \right)$.

Разобьем высоту $H = 15$ м на слои грунта (песок мелкий) в соответствии с СП 24.13330.2011 высотой по $h_i = 2$ м и нижний слой высотой 1 м. По табл. 7.3. СП будем иметь для первого слоя высотой $h_1 = 1$ м; $f_1 = 23$ кПа, в середине второго слоя (на глубине 3 м): $f_2 = 35$ кПа; для третьего слоя: $f_3 = 40$ кПа, для четвертого: $f_4 = 43$ кПа; для пятого: $f_5 = 45$ кПа; для шестого слоя высотой $h = 2$ м на глубине 11 м: $f_6 = 47$ кПа и для слоя высотой $h = 1$ м на глубине 13 м $f_7 =$ кПа. В результате несущая способность сваи будет:

$$F_d = 1 \left(2,9 \cdot 10^6 \cdot 0,09 + 1,2 \times \left(23 \cdot 2 + 35 \cdot 2 + 40 \cdot 2 + 2 \cdot 43 + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \cdot 45 + 2 \cdot 47 + 2 \cdot 48 + 1 \cdot 50 \right) 10^3 \right) = \\ = 261 + 612 = 873 \text{ кН.}$$

Значение h_0 зависит от значения нагрузки и от вида грунта и определяется по результатам испытаний пробной сваи.

Учитывая априорно принятое изменение деформации ε материала сваи по ее длине, рекомендуется в ответственных случаях провести ее расчеты по формуле (3) с выявленной функцией по результатам испытаний, как было описано выше, и с определением значения ϕ из результатов упрощенного расчета значения $H_{\text{эф}}$, используя формулу:

$$\phi = (F_p - RA) / u \gamma \xi_0 \int_0^{H_{\text{эф}}} x \varepsilon(x) dx, \text{ полученную из (3)}$$

без учета $f_{\text{отр}}$, ввиду малости влияния ее на значение $H_{\text{эф}}$ и малом значении $(H_{\text{эф}} - h_0)$. После этого определяется уточненное значение $H_{\text{эф}}$ из уравнения (3) при $F_{\text{пр}} = F_p$.

Исходными данными для расчета длины свай и размеров поперечного сечения (бетона и арматуры) также могут служить значения эксплуатационной нагрузки $F_{эк}$ на сваю и принимаемый коэффициент запаса K , одинаковый или разный по несущей способности грунта и свай. Коэффициент запаса K определяется (задается), прежде всего, по ответственности здания или сооружения, по уровню требований по безопасности их эксплуатации и недопустимости «срыва» свай. Будем считать в дальнейших расчетах висячей сваи, что коэффициент запаса K известен как по несущей способности грунта основания F_d , так и по несущей способности материала сваи. Эксплуатационная нагрузка $F_{эк}$ на сваю на стадии проектирования определяется сбором нагрузок и распределением их на сваи. В дальнейшем считаем, что $F_{эк}$ и K известны. Следовательно, свайное основание должно отвечать требованию $F_d \geq KF_{эк}$, где F_d — предельная нагрузка по обоим критериям работоспособности свай. Проблема заключается в определении значения предельной нагрузки на сваю F_d .

По существующим нормам (СП 24.13330.2011) силы трения f_i на поверхности сваи определяются по таблицам в зависимости от слоев грунта и глубины их залегания. В таблицах СП с ростом глубины слоя грунта силы трения f_i возрастают. Определение этих сил f_i производится измерениями при «срыве» свай, т.е. при ее движении в грунте. Как выше отмечалось, в конструкциях недопустимы такие события — «срывы» свай. Силы трения на поверхности сваи в условиях неподвижности возникают в результате микроперемещений (деформаций ε материала сваи в контакте с грунтом). Там, где нет деформаций сваи, там нет и сил трения. Силы трения f тем больше, чем больше деформации и нормальное боковое давление q на поверхности сваи. В свае с ростом удаления от места приложения нагрузки $F_{пр} \geq KF_{эк}$ поверхностные силы от грунта основания в виде нормального давления q растут, а деформации ε уменьшаются. В средней части сваи f_i достигнет максимума, а на глубине h будет равна нулю, как показано на рис. 8. Количественно построить эпюру f невозможно, но модель ее будет на той длине сваи, где $\varepsilon \neq 0$. В испытаниях сваи нужно выявить участок длины сваи, где выполняется условие $\varepsilon \neq 0$, т.е. где $f \neq 0$. Для выяснения этого проводятся испытания пробной сваи. Длиной сваи задаются, исходя из опытов и аналогов. На железобетонную сваю наклеивают рабочие тензорезисторы вдоль сваи и компенсационные поперек сваи через 0,4–0,5 м, покрывают их и выводящие провода эпоксидной смолой для защиты от повреждений или все монтируют в штрабе вдоль сваи. Сваю погружают в грунт основания любым способом и после «отдыха» в течение не менее пяти дней, измеряют омическое сопротивление $R_{0,i}$ рабочих тензорезисторов до нагружения сваи. Затем свая нагружается сжимающей силой, равной

$F_{эк}$, и измеряют сопротивления $R_{t,i}$. По значениям $R_{0,i}$ и $R_{t,i}$ определяют [9] деформации материала (бетона) сваи ε_i в i -х сечениях сваи по известной формуле

$$\varepsilon_i = \frac{|R_{0,i} - R_{t,i}|}{\mu R_{0,i}}.$$

По точкам значений деформаций ε_i в n сечениях сваи строят эпюру ε , соответствующую модели эпюры поверхностных сил трения f на длине участка сваи с $\varepsilon \neq 0$, как показано на рис. 8.

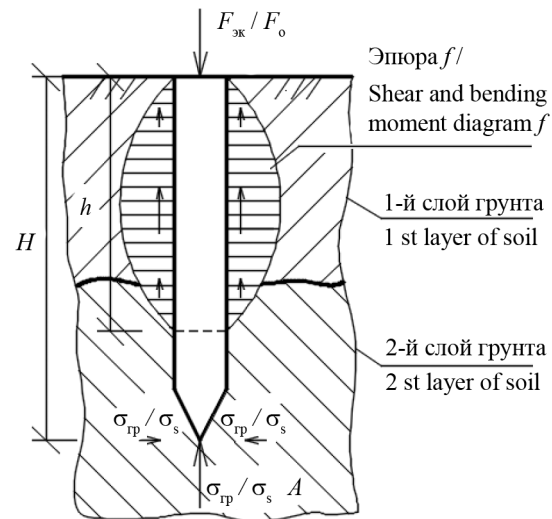


Рис. 8. Расчетная схема сваи и модель эпюры сил трения f условно при двух видах грунтов

Fig. 8. Design diagram of a pile and model of shear and bending moment diagram of friction force f for two types of soil

На участке сваи длиной h возникают силы трения f на боковой поверхности сваи. Как отмечалось выше, причиной появления сил трения на поверхности сваи, находящейся в покое, являются микроперемещения (деформации) материала сваи на участке длины сваи h (см. рис. 8). Наибольшие деформации возникают в верхней части сваи, но в силу малого бокового давления q на сваю грунта в этой части сваи силы трения f малы. С ростом глубины грунта силы q возрастают, а деформации ε , как установлено нами в испытаниях на моделях, уменьшаются и доходят до нуля на некоторой глубине h и эпюра f имеет примерный вид, показанный на рис. 8. После выявления длины $h < H$ при необходимости свая догружается добавочной силой до значения $F_{пр} = KF_{эк}$ и определяется длина эпюры или длина модели эпюры f с учетом коэффициента запаса K . При этом модель эпюры f длиной h будет в пределах длины сваи H , и тем самым определять длину рабочих свай по критерию несущей способности грунта под ростверком фундамента равной $H = h$, как показано на рис. 9. Так устанавливается длина сваи под фундаментом (под ростверком ниже поверхности грунта) по условию несущей способности грунта с учетом коэффициента запаса K . Соответственно, все размеры и состав железобетонных

свай для основания фундамента становятся известными. Напряжения грунта в нижнем конце сваи $\sigma_{гр}$ будут определяться [18] по формуле $\sigma_{гр} = \gamma H$ без учета влияния нагрузки $F_{эк}$ и $F_{пр}$, если конец сваи длиной H будет ниже полезной длины сваи h . Отрицательными силами трения пренебрегаем. Эти напряжения и соответственно сила $\sigma_{гр} \cdot A_{поп}$, где $A_{поп}$ — площадь поперечного сечения сваи, не оказывают заметного влияния на работу сваи в неплотных грунтах, и силой $\sigma_{гр} \cdot A_{поп}$ в этом случае можно пренебречь в запас надежности. В плотных грунтах можно уменьшить длину сваи за счет учета реакции под нижним ее концом, которая равна $R \cdot A$, где R — расчетное сопротивление грунта основания, определяемое по табл. 7.2. СП 24.13330.2011. Для этого испытывают новую пробную сваю нагрузкой, равной $F_{эк} - R \cdot A$, в которой значение R находят по значению $H = h$ первой пробной сваи. В результате определяют новое значение h , которое будет меньше первоначального, которое и принимается за длину сваи H .

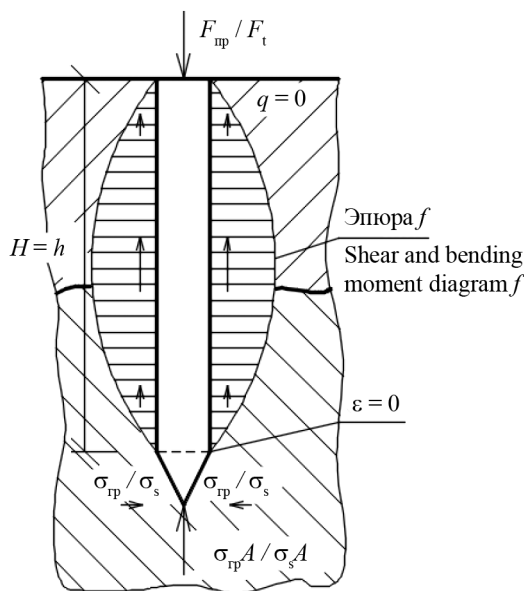


Рис. 9. Окончательная расчетная схема и длина сваи для основания фундамента

Fig. 9. Final design diagram and pile length for the foundation base

Тема статьи в общем виде обсуждалась на Международной конференции «Современные технологии фундаментостроения» [28] в ноябре 2017 г.

Расчет несущей способности висячих свай при данном подходе с учетом отрицательных сил трения-сцепления рассмотрен в работе¹.

¹ Уткин В.С. Расчет несущей способности висячих свай по несущей способности грунта основания с учетом отрицательных сил трения-сцепления // Жилищное строительство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 2 (9). С. 26–33.

Расчет висячих свай по осадке при новом подходе к описанию сил трения-сцепления

По СП 24.13330.2011 расчет осадки одиночной сваи, построенный на расчетной схеме по рис. 1, проводится по условию:

$$S \leq S_u, \quad (7)$$

где S — осадка (деформация) одиночной сваи; S_u — предельная осадка, значение которой определяется по СП 22.13330.2011. Для одиночной сваи (без уширения пяты) значение осадки определяется

по формуле $S = \beta \frac{N}{Gl}$, где N — вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю; G — средний модуль сдвига для всех слоев грунта, прорезаемых свайей; l — длина сваи в грунте основания; β — коэффициент, определяемый по формуле $\beta = \frac{\beta' 1 - (\beta' / \alpha')}{\lambda_1 x}$,

где $\beta' = 0,17 \cdot l_n (K_n G_1 e / G_2 d)$ — коэффициент, соответствующий абсолютно жесткой свае ($EA = \infty$).

Информацию о других параметрах, используемых в расчетной формуле S , и их роли в расчетах свай, можно найти в СП 24.13330.2011. Следует отметить, что все значения измеряемых величин по СП принимаются усредненными, многие параметры и коэффициенты принимаются по эмпирическим формулам без теоретического обоснования, в расчет вводится вся длина сваи. Данные факты побуждают к обсуждению используемого по СП 24.13330.2011 метода расчета осадки (деформаций) висячей сваи S и поиску новых более достоверных решений, построенных на работе сваи в состоянии покоя, а не «срыва» (движения), который в основаниях фундаментов не допускается.

Механизм передачи нагрузки на грунт основания и последующее определение осадки сваи является дискуссионным вопросом и имеет различные представления в работах [29–36].

Фундаментальные испытания по определению эффективной длины висячих буронабивных свай большого диаметра были проведены в Китае и описаны в работе [8]. В результате испытаний опытных образцов свай было установлено, что при неподвижном состоянии свай (без «срыва») касательные силы или силы трения-сцепления $f(x)$ распределены по длине сваи иначе, чем принято в СП 24.13330.2011. В работе [8] функция $f(x)$ описана кубической параболой вида:

$$f(x) = \frac{12N}{\pi d l^4} x(x-l)^2, \quad (8)$$

где l — длина сваи; N — вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю; x — расстояние от места пересечения сваи с поверхностью грунта основания до сечения сваи (переменная величина).

На рис. 10 представлена расчетная схема работы висячей сваи большого диаметра и большой

длины с силами трения-сцепления $f(x)$ на боковой поверхности свай, изменяющимися по кубической параболе.

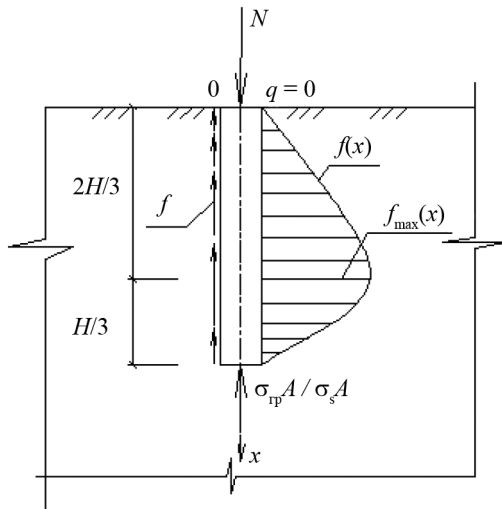


Рис. 10. Распределение сил трения-сцепления $f(x)$ по [1]

Fig. 10. Distribution of friction and cohesive forces $f(x)$ according to [1]

В исследованиях [10–12] предложено силу трения-сцепления $f(x)$ описывать функцией вида:

$$f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi, \quad (9)$$

где $\varepsilon(x)$ — функция деформаций материала свай от нагрузки N по ее длине; $q(x)$ — боковое давление грунта основания на поверхность свай; φ — коэффициент, учитывающий вид грунта основания, материал свай и другие факторы, влияющие на значе-

ния $f(x)$ для конкретного грунта основания и вида свай и определяемый по результатам испытаний пробной свай. О способах определения φ_0 будет сказано далее.

На рис. 11 показаны варианты распределения сил трения-сцепления $f(x)$ и нагрузки $q(x)$ от давления грунта на поверхность свай (варианты a и b) по длине свай. Обоснование распределения сил $f(x)$ по длине свай приведено в работах [10–12] в зависимости от значения нагрузки на сваю N при одинаковой длине свай H .

Расчет висячей свай по критерию прочности материала свай и несущей способности грунта основания при расчетных схемах ее работы по рис. 11, a, b рассмотрен выше.

Рассмотрим расчет висячих свай по критерию деформации (осадки) при новом [10–12] представлении о работе висячей свай в грунте основания при центральном приложении нагрузки. По СП 24.13330.2011 расчет свай по деформациям проводится по условию $S \leq S_u$, где S — общая осадка свай, которая складывается из деформации свай (укорочения) S_0 на ее длине h и деформации (перемещения) свай как абсолютно твердого тела в грунте основания S_1 , т.е. $S = S_0 + S_1$.

Изучим расчет осадки свай без учета фактора времени по варианту ее работы, представленному на рис. 11, a , для однослойного грунта основания. Такой вариант устройства и работы свай и свайного основания применяется, например, в пристройках к существующим объектам, когда дополнительная осадка объектов (зданий или сооружений) недопустима. Значение осадки S_0 свай за счет только ее укорочения в результате деформации материала

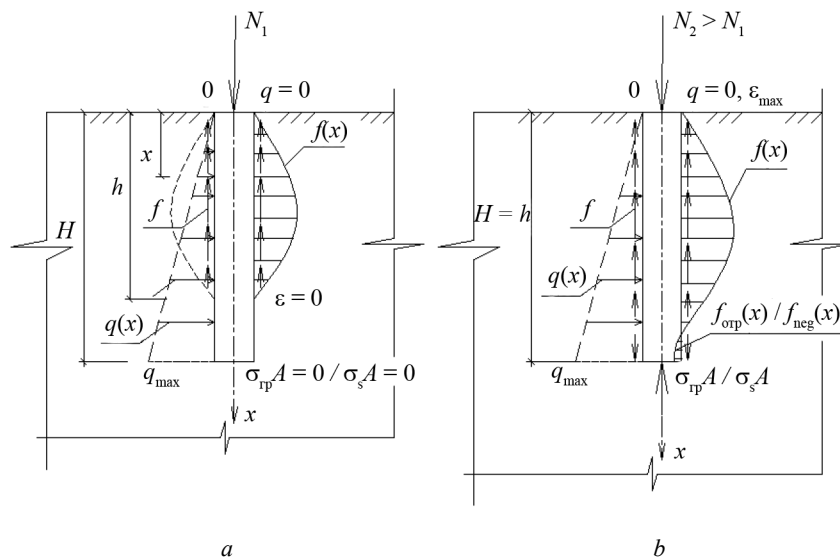


Рис. 11. Варианты возможного распределения сил трения-сцепления $f(x)$ по поверхности свай от грунта основания (отрицательными силами трения-сцепления $f_{отр}(x)$ пренебрегаем) в зависимости от нагрузки N и длины свай H

Fig. 11. Options for friction and cohesive force $f(x)$ distribution over the pile surface, if forces arise from the foundation soil (with negative friction and cohesive forces $f_{отр}(x)$ being neglected), depending on load N and pile length H

сваи от внешней нагрузки, как правило, мало. Заметное значение S_0 может иметь место при большой длине сваи ($H > h$) и значительной нагрузке N_1 . Таким образом, вариант работы сваи по рис. 11, а имеет практическое значение там, где осадка свай существенно ограничена. Этот вариант и будет рассмотрен ниже. Реакция от грунта на нижнем конце сваи в этом варианте отсутствует (равна нулю), поэтому перемещение сваи в виде составляющей S_1 в грунте (как абсолютно твердого тела) равно нулю (свая неподвижна). В этом случае $S = S_0 + S_h$. Значение S_0 в виде упругого сжатия на длине сваи h от внешней нагрузки N_1 найдем на всей длине сваи h суммированием (интегрированием) элементарных перемещений dS микроэлементов сваи длиной dx . По закону Гука на элементарной длине dx сваи бетонной, металлической или деревянной величина ее укорочения будет составлять:

$$dS = \frac{N(x)}{EA} dx, \quad (10)$$

где $N(x)$ — усилие в сечении сваи на глубине x от верхнего ее конца; E — модуль упругости материала сваи; A — площадь поперечного сечения сваи. Для железобетонной сваи необходимо учесть совместную работу бетона и арматуры

и $dS = \frac{N(x)}{E_b A_b + E_s A_s} dx$ при $\varepsilon_b = \varepsilon_s$. В дальнейшем

для сокращения формул будем рассматривать сваи из однородного материала.

Полная осадка сваи по схеме на рис. 11, а будет равна $S = \int_0^h \frac{N(x)}{EA} dx$. Значение $N(x)$ можно опре-

делить в нижней части сваи, в которой ниже сечения x от верхнего конца сваи действует только сила трения-сцепления $f(x)$. Введем для нижнего конца сваи ось z с началом координат в сечении сваи $x = h$, направленную вверх. Тогда в одном и том же сечении сваи будем иметь $N(x) = N(z)$, где $N(z) = u \int_0^z f(x) dx$.

Или $N(z) = u \int_0^z \varepsilon(x) q(x) \varphi dx$. Подставляя $N(z)$ в $dS = \frac{N(x)}{EA} dx$ вместо $N(x)$ получим

$$dS = \left(\frac{u \int_0^z \varepsilon(x) q(x) \varphi dx}{EA} \right) dz.$$

Отсюда:

$$S_0 = \int_0^h \frac{u \varphi}{EA} \left(\int_0^z \varepsilon(x) q(x) dx \right) dz. \quad (11)$$

Для решения примем по [27] $q(x) = \gamma \xi_0 x$, где γ — объемный вес грунта основания; $\xi_0 = \mu_0 / (1 - \mu_0)$,

где $\mu_0 = 0,10/0,15$ для глин и суглинков; $\mu_0 = 0,20/0,25$ для песков. Выражение $\varepsilon(x)$ находят по результатам измерений омического сопротивления R_i в материале сваи до и после нагружения сваи по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{|R_0 - R_i|}{\mu R_0}.$$

По результатам испытаний пробной сваи нагрузкой N_1 и измерений деформаций материала сваи ε_i находят функцию $\varepsilon(x)$, например по методу наименьших квадратов, устанавливают значение h .

Для уменьшения трудоемкости в определении функции $\varepsilon(x)$ примем изменение $\varepsilon(x)$ по прямой с $\varepsilon_{\max} = \frac{N_1}{EA}$ в вершине сваи при $x = 0$. При

$x = h$ имеем $\varepsilon = 0$ (см. рис. 11, а), тогда функция $\varepsilon(x)$ примет вид: $\varepsilon(x) = \frac{N_1}{EA} \left(1 - \frac{x}{h} \right)$. В результате имеем

$f(x) = \frac{N_1}{EA} \gamma \xi_0 \varphi_0 \left(1 - \frac{x}{h} \right) x$, т.е. $f(x)$ изменяется по квадратной параболе.

Подставляя выражения параметров $\varepsilon(x)$, $q(x)$, φ в (3), получим:

$$S_0 = \int_0^h \frac{u \varphi_0}{EA} \left(\int_0^z \frac{N_1}{EA} \left(1 - \frac{x}{h} \right) \gamma \xi_0 x dx \right) dz \text{ или}$$

$$S_0 = \int_0^h \frac{u \varphi_0}{EA} \gamma \xi_0 \frac{N_1}{EA} \left(\frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{3h} \right) dz.$$

После интегрирования имеем:

$$S_0 = \frac{u \varphi \gamma \xi_0 N_1}{6(EA)^2} h^2. \quad (12)$$

Найдем выражение φ_0 . Из $N_1 = u \int_0^h f(x) dx$ или

$$N_1 = u \int_0^h \frac{N_1}{EA} \gamma \xi_0 \varphi x \left(1 - \frac{x}{h} \right) dx \text{ после сокращения } N_1$$

и интегрирования устанавливают значение:

$$\varphi = \frac{6EA}{u \gamma \xi_0 h^2}. \quad (13)$$

С учетом выражения φ по (15) и подстановки (15) в (14) получим значение осадки сваи по варианту ее работы, показанному на рис. 11, а:

$$S_0 = \frac{N_1 h}{2EA}. \quad (14)$$

По [8], при изменении $f(x)$ по кубической параболе на поверхности сваи (большого диаметра), значение S_0 представлено формулой (в обозначениях [8]): $S_0 = \frac{2NH}{5EA}$, где H — длина сваи.

По стандарту NEN 6743 имеем $S_0 = \frac{NH}{EA}$, где N — среднее значение силы, действующей на сваю.

Из формулы (14) при известных значениях S_0 , N , E , A можно найти высоту свай h (см. рис. 11, а). Длина свай H принимается больше или равной длине h , если осадка свай ограничена значением S_0 . При $H = h$ длина свай считается эффективной [8]. Длина свай H должна проверяться по несущей способности грунта основания методом, описанным в труде [4].

Пример 3. Пусть условно известны $N_1 = 0,8 \cdot 10^6$ Н, $h = 25$ м, $A = 0,009$ м², $E = 2 \cdot 10^{10}$ Па. Тогда по (14)

$$\text{получим: } S_0 = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 25}{2 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,6 \text{ мм.}$$

Рассмотрим пример расчета осадки свай за счет сжатия по СП 24.13330.2011 при тех же исходных данных, что и в первом примере. Для этого по СП 24.13330.2011 п.7.4.9 допускается использовать

$$\text{формулу (в обозначениях СП) вида } \Delta = \frac{P(l-a)}{EA}.$$

При $N = 0,8 \cdot 10^6$ Н, $l = 25$ м, $A = 0,009$ м², $E = 2 \cdot 10^{10}$ Па и $a = 1,2$ м (a — расстояние между сваями) имеем:

$$\Delta = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot (25 - 1,2)}{2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 10,6 \text{ мм.}$$

По расчету осадки S_0 по формуле из [8] имеем

$$S_0 = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 10^6 \cdot 26,2}{5 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} = 4,66 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,66 \text{ мм.}$$

Расчет осадки S_0 по формуле стандарта NEN

$$6743 \text{ дает } S_0 = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 26,2}{2 \cdot 10^{10} \cdot 0,09} = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 11,6 \text{ мм.}$$

Расчет S_0 по NEN 6743 при некотором среднем значении силы N , которое принимается в примере равным $0,8 \cdot 10^6$ Н, будет в 2 раза больше, как и по СП, по сравнению с решением по формуле (14).

Результаты расчетов осадки свай S_0 в примерах при новом подходе в России и Китае к работе свай в грунте основания выявляют резерв несущей способности свай по ее осадке S_0 по сравнению с результатами расчетов по существующим нормам расчета S_0 .

Второй вариант работы свай в грунте при нагрузке на сваю, равной N_2 , по рис. 11, б и осадке свай $S = S_0 + S_1$ при нагрузке $N_2 > N_1$ учитывает действие реакции $\sigma_{\text{тр}} A$ на нижнем конце свай. В этом варианте осадка свай складывается из осадки S_0 , вызванной деформацией материала свай по приведенному варианту работы свай в грунте, и осадки свай S_1 , вызванной перемещением свай как абсолютно твердого тела в грунте основания под действием нагрузки N_2 по варианту на рис. 11, б.

Расчет несущей способности свай-стоек с учетом трения-сцепления на поверхности свай

В соответствии с требованиями ГОСТ-27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», необходимо проводить расчеты

конструкций по надежности (безопасности эксплуатации) и несущей способности для недопущения в них превышения предельных состояний (п. 3.1.1) и обеспечения безопасной эксплуатации. В число таких элементов входят свай-стойки. По СП 24.13330.2011 свай-стойки рассчитываются по прочности материала свай при их сжатии эксплуатационной нагрузкой и по несущей способности грунта под нижним концом свай. Влияние грунта основания, расположенного выше нижнего конца свай, на несущую способность свай-стоек по СП 24.13330.2011 и другим нормам не учитывается. Это можно объяснить тем, что перемещение свай, упирающейся в скальный или малосжимаемый грунт, практически равно нулю, поэтому нет движения свай и, следовательно, якобы нет воздействия сил трения на сваю. В действительности силы трения возникают не только при движении свай, но и при отсутствии механического перемещения свай как целого, а именно в результате микроперемещений (деформаций) поверхностных слоев свай, находящихся в контакте с грунтом основания. Вторая, более объективная, причина неучета работы грунта в работе свай-стоек может быть оправдана тем, что на нижнем конце свай возникают отрицательные силы трения-сцепления $f_{\text{отр}}(x)$ на поверхности свай в результате ее деформирования, вызванного силой-реакцией в нижнем опорном конце свай $\sigma_{\text{тр}} A$ или RA , направленной вверх. В этом случае отрицательные силы трения-сцепления $f_{\text{отр}}(x)$ от реакции $\sigma_{\text{тр}} A$ или RA будут направлены вниз свай, т.е. противоположно направлению сил трения-сцепления $f(x)$ от нагрузки в верхнем конце свай и будут снижать ее положительную роль в работе свай. Однако роль и значение отрицательных сил трения-сцепления в работе свай-стоек пока не выявлены.

Учет работы грунта основания в сваях-стойках при расчете несущей способности по критерию несущей способности грунта основания и снижение отрицательных сил трения $f_{\text{отр}}(x)$ представляют практический интерес, т.к. возможно использование резерва несущей способности грунта основания и возможен экономический эффект при устройстве свайного основания.

Исследование возникновения и распределения отрицательных сил трения-сцепления вызывает большой научный интерес у исследователей [37–42].

Метод расчета несущей способности свай-стоек в основаниях фундаментов приведен по СП 24.13330.2011 «Свайные основания», однако без учета несущей способности грунта основания выше скального или малосжимаемого грунта. В последнее время предложены новые расчетные схемы работы свайных свай и свай-стоек в грунте оснований, в которых учитывается новый подход к описанию работы свай под нагрузкой в грунте основания в состоянии их покоя, а не «срыва».

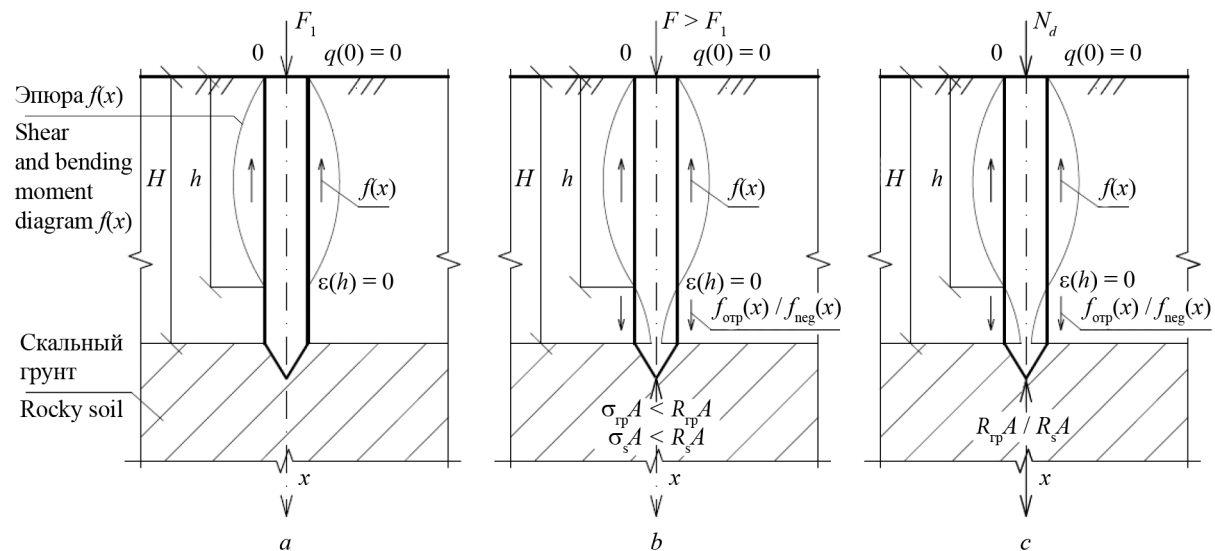


Рис. 12. Варианты работы сваи-стойки в грунте основания: F — расчетная нагрузка (с учетом веса сваи); N_d — предельная нагрузка по несущей способности грунта основания; $f_{opr}(x)$ — отрицательные силы трения-сцепления

Fig. 12. Options of the end-bearing pile behaviour in the foundation soil: F — design load (taking into account the weight of the pile); N_d — limit load of the bearing capacity of foundation soil; $f_{neg}(x)$ — negative friction and cohesive forces

Для разработки метода расчета несущей способности сваи-стойки с учетом работы грунта, расположенного выше скального или малосжимаемого, предварительно рассмотрим работу сваи-стойки в грунте основания. В отличие от существующего представления работы сваи-стойки по СП 24.13330.2011 на практике могут реализовываться различные варианты работы сваи-стойки в грунте основания после ее забивки (погружения в грунт) до скального или малосжимаемого грунта, представленных на рис. 12, после их нагружения различной по значению силой F .

Вариант по рис. 12, *a* соответствует малой нагрузке F_1 или большой длине сваи, а также при глубоко залегании скального грунта. Участок сваи длиной $(H - h)$ по варианту рис. 12, *a* в расчетах по несущей способности грунта основания является резервным элементом. Использование такой сваи неэффективно по расходу материала сваи. Вариант по схеме 12, *b* нагружен силой $F > F_1$, но меньше предельной нагрузки N_d , как показано на схеме рис. 12, *c* при полном использовании несущей способности грунта основания. Нагрузка на сваю по рис. 12, *b* определяется из условия равновесия сил по схеме 12, *b* по формуле:

$$F = \sigma_{гр} A + u \int_0^h f(x) dx - u \int_h^H f_{opr}(x) dx. \quad (15)$$

Отрицательные силы трения-сцепления $f_{opr}(x)$ возникают вследствие деформаций материала сваи от силы $\sigma_{гр} A$. При защите сваи в нижнем конце от воздействия силы $f_{opr}(x)$, например при изоляции нижней части сваи от грунта основания на участке длиной $(H - h)$, формула (1) представится в виде:

$$F = \sigma_{гр} A + u \int_0^h f(x) dx. \quad (16)$$

В дальнейшем будем рассматривать расчет несущей способности сваи, мерой которой будет значение предельной нагрузки N_d по варианту расчетной схемы рис. 12, *c*, которая формируется из схемы рис. 12, *b* в результате возрастания нагрузки F , без учета $f_{opr}(x)$.

В выражении (16) напряжение $\sigma_{гр}$ в скальном или малосжимаемом грунте основания под нижним концом сваи можно определить по результатам испытаний грунта или по испытаниям пробной сваи с тензорезисторами на нижнем конце сваи; u — периметр поперечного сечения сваи; A — площадь поперечного сечения сваи; h — высота слоя грунта, на длине которого действуют силы трения-сцепления $f(x)$ на поверхности верхнего участка сваи h при нагрузке F и при напряжении грунта $\sigma_{гр}$. Силу трения-сцепления $f(x)$ с учетом непрерывности функций $\varepsilon(x)$ и $q(x)$ в дальнейшем будем представлять формулой:

$$f(x) = \varepsilon(x) q(x) \varphi. \quad (17)$$

По исследованию [27] $q(x) = \gamma \gamma_0 x$, где γ — объемный вес верхнего слоя грунта, $\xi_0 = \mu_0 / (1 - \mu_0)$. Например, для глин и суглинков $\mu_0 = 0,10/0,15$; φ — безразмерный коэффициент, зависящий от h .

Предлагается описывать $\varepsilon(x)$ линейной функцией вида $\varepsilon(x) = \varepsilon_{\max}(h - x) / h$, как показано на рис. 13 при известном значении $\varepsilon_{\max} = (F - \sigma_{гр} A) / AE_c$ или при обозначении $F - \sigma_{гр} A = F_1$, $\varepsilon_{\max} = F_1 / AE_c$, где E_c — модуль упругости материала сваи. Формулу (19) для расчетной схемы по рис. 12, *b* можно представить в виде:

$$f(x) = \frac{(F - \sigma_{\text{тр}} A)}{AE_c} \gamma \xi_0 \varphi \frac{h-x}{h} x, \quad (18)$$

где $\sigma_{\text{тр}}$ — определяется на глубине H инструментально по пробной свае.

Для варианта расчетной схемы по рис. 12, а, но при $h = H$, $\sigma_{\text{тр}} = 0$ и $F - \sigma_{\text{тр}} A = F_1$, можно формулу (18) записать в виде:

$$f(x) = \frac{F_1}{AE_c} \gamma \xi_0 \varphi(H) \frac{H-x}{H} x. \quad (19)$$

Из условия равновесия сил в пробной свае в грунте основания под нагрузкой F при известном h , по расчетной схеме рис. 2 и по расчетной формуле (1) или (2) с учетом (4) можно найти среднее значение φ для конкретной пробной сваи по средним значениям h , E_c , γ , $\sigma_{\text{тр}}$. Значение E_c определяется неразрушающим методом, который зависит от материала сваи. Для бетона различного класса значение E_c можно найти в СП 63.13330.2012. Для описания выражения зависимости φ от параметров рассмотрим формулу (18), в которой известны значения F , $\sigma_{\text{тр}}$, γ , h , E_c .

Из (17) с учетом (10) имеем

$$F = \sigma_{\text{тр}} A + u \int_0^h \left(\varepsilon_{\text{max}} \frac{h-x}{h} \right) \gamma \xi_0 x \varphi dx.$$

После интегрирования и преобразования получим:

$$F = \sigma_{\text{тр}} A + \frac{u \varepsilon_{\text{max}} \gamma \xi_0 \varphi h^2}{6}. \quad (20)$$

При средних значениях параметров в (20) найдем выражение для φ в виде функции от h

$$\varphi = \frac{6(F - \sigma_{\text{тр}} A)}{u \varepsilon_{\text{max}} \gamma \xi_0 h^2}, \quad \text{или} \quad \text{при} \quad \varepsilon_{\text{max}} = (F - \sigma_{\text{тр}} A) / AE_c$$

имеем:

$$\varphi = \frac{6AE_c}{u \gamma \xi_0 h^2}. \quad (21)$$

При всех известных членах в (21) φ зависит от h , формулу для определения φ можно получить при другом подходе. На рис. 13 представлен элемент сваи заданной высоты x и рассмотрено условие его равновесия при линейной функции $\varepsilon(x)$.

Из рис. 13, полученного из схемы по рис. 12, а, видно, что $F_* - N(x) - u \int_0^x f(z) dz = 0$. При $f(z) = \varepsilon(z) q(z) \varphi$, где $\varepsilon(z) = \varepsilon_{\text{max}} \frac{h-z}{h} = \frac{F_*}{AE_c} \cdot \frac{h-z}{h}$, $q(z) = \gamma \xi_0 z$ и $f(z) = \frac{F_*}{AE_c} \cdot \frac{h-z}{h} \gamma \xi_0 z \varphi$:

$$F_* - N(x) - u \frac{F_* \gamma \xi_0 \varphi}{AE_c h} \int_0^x (h-z) z dz = 0. \quad (22)$$

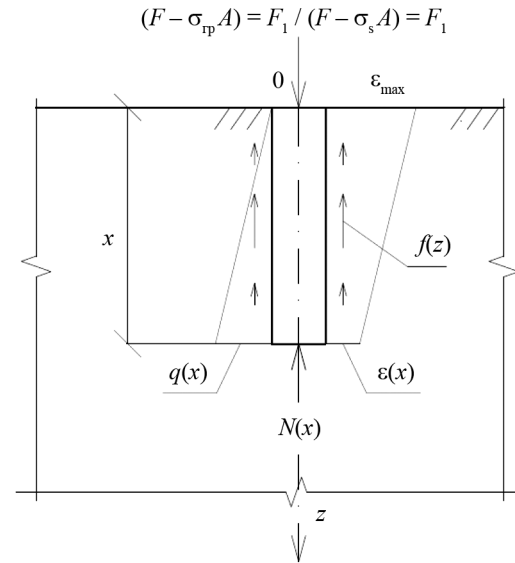


Рис. 13. Элемент сваи-стойки произвольной длины $x < h$
Fig. 13. Element of an end-bearing pile having random length $x < h$

В сечении $z = h$ от F_* имеем $\varepsilon(h) = 0$. Подставляя их в (22), найдем $\varphi = \frac{6AE_c}{u \gamma \xi_0 h^2}$, т.е. такое же, как (21).

Рассмотрим порядок значения φ . Пусть известны значения $E_c = 30 \cdot 10^9$ Па (бетон В30); $A = 0,09$ м²; $u = 1,2$ м; $h = 6$ м; $\xi_0 = 0,14$; $\gamma = 19 \cdot 10^3$ Н/м³ имеем

$$\varphi = \frac{6 \cdot 30 \cdot 10^9 \cdot 0,09}{1,2 \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 0,14 \cdot 6^2} = 14 \cdot 10^4.$$

Процесс загрузки сваи на рис. 12 имеет определенную последовательность. Сначала свая работает по схеме (рис. 12, а) до тех пор, пока свая не упрется в скальный грунт. Нагрузка F_1 будет тем больше, чем больше будет высота верхнего слоя грунта основания и его прочность. После достижения скального грунта, деформации материала сваи будут возрастать от дополнительной нагрузки до появления реакции $\sigma_{\text{тр}} A$. Силы трения-сцепления $f(x)$ будут возрастать с возрастанием $\sigma_{\text{тр}} A$, не изменяя формы эпюры $f(x)$. Нагрузка F на сваю может возрастать до прочности материала сваи или прочности скального грунта под нижним концом сваи. Соответственно, предельная нагрузка N_d на сваю будет определяться прочностью материала сваи $N_d = R_{\text{св}} A$ и прочностью скального грунта $R_{\text{св}}$ с учетом несущей способности верхнего слоя грунта. Рассмотрим вариант, в котором предельная нагрузка N_d на сваю-стойку будет определяться значением $R_{\text{тр}} A$, где $R_{\text{тр}}$ по СП 24.13330.2011 — расчетное сопротивление скального грунта. Для забивных свай, опирающихся на скальный грунт СП 24.13330.2011, принимается $R_{\text{тр}} = 20$ МПа при прочности $R_{\text{св}}$ сваи более 20 МПа. Предельная нагрузка F_2 , воспринимаемая сваями по прочности скального грунта, будет $F_2 = R_{\text{тр}} A$.

Дополнительная нагрузка за счет учета работы верхнего слоя грунта $F_1 = u \int_0^h f(x) dx$. $f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi$ при наибольшей деформации материала сваи $\varepsilon_{\max}$ от $F_1 + F_2$ не более предельной $\varepsilon_{\text{пр}}$, определяемой, например, для железобетонных свай по СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Предположим, что $\varepsilon_{\max} < \varepsilon_{\text{пр}}$, где $\varepsilon_{\max} = (F_1 + F_2)/AE_c E_c$ — модуль упругости материала сваи. Для бетона класса В30 $E_c = 3 \cdot 10^{10}$ Па. Для упрощения расчета примем что $\varepsilon(x)$ в материале сваи изменяется по линейному закону $\varepsilon(x) = \varepsilon_{\max} (h-x)/h$, где $\varepsilon_{\max} = (F_1 + R_{\text{гр}} A)/AE_c$. При $\varepsilon_{\max} > \varepsilon_{\text{пр}}$ в расчете принять $\varepsilon_{\text{пр}}$. Боковое давление грунта на сваю по [27] $q(x) = \gamma \xi_0 x$.

$$\text{Тогда } f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi = \varepsilon_{\max} \frac{(h-x)}{h} \gamma \xi_0 x \varphi, \text{ где по (22)}$$

$$\varphi = \frac{6AE_c}{u\gamma \xi_0 h^2}.$$

После подстановки выражения $\varepsilon_{\max}$ имеем $f(x) = \frac{F_1 + R_{\text{гр}} A}{AE_c} \cdot \frac{h-x}{h} \gamma \xi_0 x \varphi$. Подставляя $f(x)$ в формулу F_1 для верхнего слоя грунта, получим: $F_1 = u \int_0^h \frac{F_1 + R_{\text{гр}} A}{AE_c} \gamma \xi_0 \varphi \frac{h-x}{h} x dx$ при нагрузке сваи силой $F_1 + R_{\text{гр}} A$, вызывающей деформацию сваи в грунте и соответствующую силу трения-сцепления $f(x)$. После интегрирования имеем:

$$F_1 = u \frac{F_1 + R_{\text{гр}} A}{6AE_c} \gamma \xi_0 \varphi h^2. \text{ Отсюда}$$

$$F_1 = u R_{\text{гр}} A \gamma h^2 \xi_0 \varphi / (6AE_c - u h^2 \gamma \xi_0 \varphi), \quad (23)$$

где $R_{\text{гр}}$ — расчетное сопротивление скального грунта.

При $\varepsilon_{\max} > \varepsilon_{\text{пр}}$ примем:

$$F_1 = u \varepsilon_{\text{пр}} \gamma \xi_0 \varphi h^2 / 6. \quad (24)$$

Общая предельная нагрузка на сваю-стойку будет: $N_d = F_1 + R_{\text{гр}} A$, где $R_{\text{гр}}$ — расчетное сопротивление скального грунта. Коэффициент запаса сваи по несущей способности грунта основания составляет $K = N_d/F$, где N_d — это $F_1 + R_{\text{гр}} A$, а $F = \sigma_{\text{гр}} A + \frac{u \varepsilon_{\max} \gamma \xi_0 \varphi h^2}{6}$.

Пример 4. Пусть известны значения $u = 1,2$ м; $A = 0,09$ м²; $\gamma = 19 \cdot 10^3$ Н/м³; $\xi_0 = 0,12$ (глина); $F = 3 \cdot 10^6$ Н; $h = 6$ м; $R_{\text{гр}} = 16 \cdot 10^6$ Па; $\varphi = 14 \cdot 10^4$; $E_c = 30 \cdot 10^9$ Па. Для бетона $\varepsilon_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ по СП 63.13330.2012 при непродолжительном действии нагрузки. $F_2 = R_{\text{гр}} \cdot A = 16 \cdot 10^6 \cdot 0,09 = 1,44 \cdot 10^6$ Н. Т.к. $\varepsilon_{\max} = (F_1 + R_{\text{гр}} A)/AE_c = 3,58 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ для бетона, поэтому по (24) принимаем: $F_1 = 3,45 \cdot 10^6$ Н.

С увеличением толщины и прочности верхнего слоя грунта эффект от учета его в значении предельной нагрузке N_d увеличивается.

Расчет надежности свай по критериям прочности материала сваи и грунта основания

Расчет надежности висячих свай по прочности материала сваи по СП 24.13330.2011

По СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» железобетонные сваи проектируют из тяжелого бетона, а рассчитывают по критерию прочности материала сваи и по несущей способности грунта основания фундамента. Согласно ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», «для каждой учитываемой расчетной ситуации надежность строительных конструкций должна быть обеспечена расчетом». В стандарте отмечено, что «условие обеспечения надежности оснований состоит в том, чтобы расчетные значения усилий, напряжений, деформаций не превышали соответствующие им предельные значения».

В работе [43] описывается процесс пересмотра норм проектирования свайных фундаментов в Китае на основе положений теории надежности. Отмечается, что при назначении размеров свай по результатам предыдущих норм их индекс надежности находился в интервале 3,08–4,64. А при назначении размеров по результатам испытаний индекс надежности составлял 5,675,89. В [44] рассматривается подход к прогнозированию осадки сваи на основе положений теории вероятностей. Вероятностный анализ работы групп свай с учетом жесткости сооружения и пространственной изменчивости грунта рассмотрен в исследовании [45].

Свайное основание можно представить в понятиях теории надежности [46] как параллельную механическую систему, состоящую из системы свай. Для определения надежности такой системы необходима информация о значениях надежности каждой сваи и их взаимной зависимости.

В данном разделе будет рассмотрена проблема расчета надежности отдельной висячей железобетонной сваи. Висячая железобетонная свая по условию ее работы также представляет условную механическую систему в понятиях теории надежности, так как должна обеспечить надежность по критериям прочности материала сваи и по несущей способности грунта основания фундамента. В таком понятии работы сваи, железобетонная свая представляет собой условную последовательную систему, так как отказ по одному из двух предельных состояний приводит к отказу работы сваи в основании. Для последовательных систем вероятность P_c безотказной работы по [46] определяется по формуле

$$P_c = \prod_{i=1}^n P_i, \text{ где } P_i \text{ — вероятность безотказной работы}$$

i -го элемента. Для сваи имеем $P_c = P_1 P_2$, где P_1 — вероятность безотказной работы сваи по критерию прочности материала сваи; P_2 — вероятность безотказной работы сваи по критерию несущей способности грунта основания.

Если расчет надежности свай проводится возможностными методиками [47], то надежность свай как системы определяется интервалом надежности $[N_{\min}, R_{\min}]$, где N — необходимость безотказной работы; R — возможность безотказной работы свай из двух моделей предельных состояний (прочности материала свай и несущей способности грунта).

Рассмотрим расчет надежности свай железобетонной свай по критерию прочности материала свай, как более сложную методику для расчета надежности, т.к. в работе на восприятие нагрузки участвуют два материала: сталь и бетон, обладающие различными механическими свойствами. По СП 24.13330.2011 предельное состояние свай по прочности материала свай определяется условием $F \leq F_d$, где F — центрально-сжимающая нагрузка на сваю от фундамента (ростверка) без учета собственного веса свай; F_d — несущая способность свай по критерию прочности материала свай. Значение F определяется расчетом на стадии проектирования или измерениями на стадии эксплуатации или испытаниями пробных свай, и в общем является случайной величиной ($\tilde{F}$). Значение F_d определяется по СП 24.13330.2011 по формуле $F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{c,b} R_b A_b + \gamma_{c,s} R_s A_s)$. Значение параметров в формуле F_d можно найти в СП 24.13330.2011. Обратим лишь внимание на то, что не могут напряжения в виде расчетных сопротивлений R_s и R_b в свае возникнуть одновременно, т.к. в соответствии с гипотезой плоских сечений деформации в арматуре ε_s и в бетоне ε_b будут одинаковыми, а наименьшая предельная деформация (допустимая) будет для стали и равна $\varepsilon_{s,пр} = 0,002$, в то время как для бетона по СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции», $\varepsilon_{b,пр} = 0,0034$. Следовательно вместо R_b следует записать $\varepsilon_{s,пр} \cdot E_b$, где E_b — модуль упругости бетона, соответствующий деформации бетона $\varepsilon_b = \varepsilon_{s,пр}$. В этом случае математическая модель предельного состояния свай по прочности материалов с учетом изменчивости параметров E_b и E_s примет вид:

$$\tilde{F} = \gamma_c \varepsilon_{s,пр} (\gamma_b \tilde{E}_b A_b + \gamma_s \tilde{E}_s A_s). \quad (25)$$

Изменчивость модуля упругости стали $\tilde{E}_s$ мала, в расчетах надежности конструкций ее можно принять детерминированной величиной, а по СП 63.13330.2012 равной $E_s = 2 \cdot 10^{11}$ Па, что и будет принято ниже. Для расчета надежности свай используем возможностный метод [47], так как для вероятностно-статистического метода по одной, как правило, пробной свае, статистическая информация о $\tilde{E}_b$ и $\tilde{F}$ будет ограниченная (мала для вероятностных методов расчета). Возможностный метод расчета надежности позволяет проводить расчеты при ограниченной информации, но результат расчета получается в интервальном виде, естественно, менее информативным. По этому расчету изменчивые параметры в выражении (25) $\tilde{E}_b$ и $\tilde{F}$ называются нечеткими переменными и в теории возможностей

обозначаются $X = \tilde{F}$ и $Y_1 = \gamma_c \gamma_b \varepsilon_{s,пр} \tilde{E}_b A_b$, которые характеризуются (описываются) функциями распределения возможностей.

В зарубежных работах имеются примеры использования нечетких множеств и нечеткой логики для моделирования отдельных видов работы свай [48–51].

Наибольшее использование в расчетах надежности получила [47] функция распределения возможностей вида:

$$\pi_X(x) = \exp \left[\left(-\frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (26)$$

где $a_x = 0,5(x_{\max} + x_{\min})$, $b_x = 0,5 \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$,

$\alpha \in [0,1]$; значением α при расчетах задаются [47].

Обозначим в (25) при детерминированном E_s $c = \gamma_c \gamma_s \varepsilon_{s,пр} E_s A_s$, $Y_1 = \gamma_c \gamma_b \varepsilon_{s,пр} \tilde{E}_b A_b$, $Y = Y_1 + C$, $a_y = 0,5 \times$

$\times (Y_{\max} + Y_{\min})$, $b_y = 0,5 \frac{(Y_{\max} - Y_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$, при том же значении α , C — детерминированная величина. С учетом принятых обозначений по (25) будем иметь расчетную математическую модель предельного состояния свай по прочности ее материала:

$$X \leq Y. \quad (27)$$

На рис. 14 показаны функции распределения возможностей нечетких переменных $\pi_X(x)$ и $\pi_Y(y)$ для свай в рабочем состоянии, т.е. по (3), где X — нагрузка; Y — прочность.

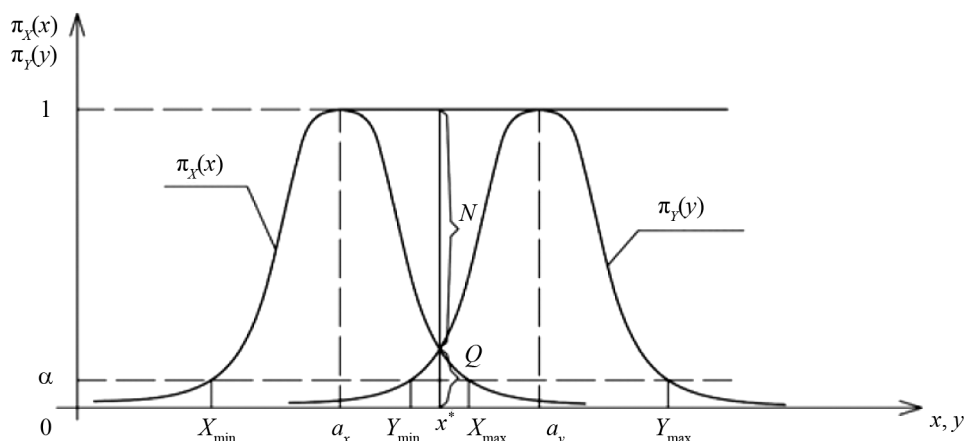
Из рис. 14 видно, что $N = 1 - Q$. Значение Q найдем как ординату точки пересечения $\pi_X(x)$ и $\pi_Y(y)$. При $a_x \leq a_y$ возможность безотказной работы свай по (27), обозначаемая R , равна единице, $R = 1$. Надежность свай по критерию прочности материала характеризуется интервалом $[N, R]$.

Пример 5. Пусть условно известны $A_b = 314 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, $A_s = 452 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $\varepsilon_s = 0,002$, $E_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\gamma_c = 1$, $\gamma_b = 0,85$, $\gamma_s = 1$, $E_b = \{20, 22, 24\} 10^9 \text{ Па}$, $\alpha = 0,1$, $X = F = \{8, 9, 10\} 10^5 \text{ Н}$.

Найдем: $a_x = 9 \cdot 10^5 \text{ Н}$, $b_x = 67 \cdot 10^3 \text{ Н}$, $\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot \varepsilon_s \cdot A_b = 1 \cdot 0,85 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 10^{-4} = 534 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$. $C = 1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{11} = 181 \cdot 10^3 \text{ Н}$. $Y_1 = \{20, 22, 24\} 534 \cdot 10^2 \text{ Н}$. Так как $Y = Y_1 + C$, то $a_y = 534 \cdot 22 \cdot 10^2 + 181 \cdot 10^3 \text{ Н} = 13,6 \times 10^5 \text{ Н}$ и найдем $b_y = 0,5 \frac{534 \cdot 10^2}{\sqrt{-\ln 0,1}} = 71,2 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Так как $a_x = 9 \cdot 10^5 < a_y = 13,6 \cdot 10^5 \text{ Н}$, то $R = 1$. Найдем значение Q , как ординату точки пересечения $\pi_X(x)$ и $\pi_Y(y)$. Используем для описания X функцию $\pi_X(x)$ вида (26) и такую же функцию для $\pi_Y(y)$. Из равенства $\pi_X(x) = \pi_Y(y)$ при $x = y$ найдем, после некоторых преобразований, уравнение в абсолютных величинах

$$\left| \frac{x - a_x}{b_x} \right| = \left| \frac{x - a_y}{b_y} \right|. \quad \text{Подставляя значе-}$$

Рис. 14. Функции распределения $\pi_x(x)$ и $\pi_y(y)$ Fig. 14. Distribution functions $\pi_x(x)$ and $\pi_y(y)$

ния a_x, a_y, b_x, b_y из результатов решения примера, найдем четыре значения x (или y). Выбираем то значение x , которое соответствует рис. 14, т.е. $a_x \leq x \leq a_y$.

$$\text{По примеру имеем } \left| \frac{x - 9 \cdot 10^5}{67 \cdot 10^3} \right| = \left| \frac{x - 13,6 \cdot 10^5}{71,2 \cdot 10^3} \right|.$$

Отсюда $x = 11,23 \cdot 10^5$ Н. По (26) возможность отказа

$Q = e^{-\left(\frac{x-a_x}{b_x}\right)^2} = e^{-\left(\frac{11 \cdot 10^5 - 9 \cdot 10^5}{67 \cdot 10^3}\right)^2} = 1,2 \cdot 10^{-4}$. Необходимость безотказной работы сваи $N = 1 - Q = 0,99988$. Надежность сваи по прочности ее материала характеризуется интервалом $[0,99988; 1]$. При $X = \tilde{F} = \{9, 10, 11\} \cdot 10^5$ Н получим $N = 0,99824$. При $X = \tilde{F} = \{10, 11, 12\} \cdot 10^5$ Н имеем $N = 0,96$.

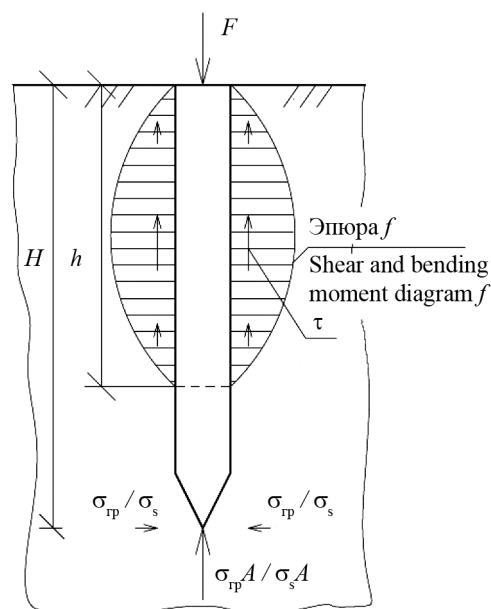
Расчет сваи по критерию несущей способности грунта основания по СП 24.13330.2011 производится

по формуле $F \leq F_d$, где $F_d = \gamma_c \left(\gamma_{cr} R A + u \sum_{i=1}^n \gamma_{cf} f_i h_i \right)$,

R — расчетное сопротивление грунта основания под нижним концом сваи с площадью поперечного сечения A и периметром u ; f_i — усредненная поверхностная сила трения-сцепления слоя грунта высотой h_i ; $\gamma_c, \gamma_{cf}, \gamma_{cr}$ — коэффициенты условия работы.

На рис. 15 представлена расчетная схема висячей сваи в грунте, показаны силы, действующие на сваю F и τ , и условная «эпюра» f сил трения-сцепления при $H > h$. Нижний конец сваи на длине $H - h$ не участвует в работе на действие нагрузки F и является резервом несущей способности сваи на случай возрастания нагрузки F или снижения несущей способности грунта, например, при обводнении, как было в Российской Федерации в весенне-летнее время на юге страны и на Дальнем Востоке.

Из работы сваи в грунте по рис. 15 видно, что вся нагрузка F от фундамента (ростверка) на сваю воспринимается в условиях ее безотказной (надежной) работы силами τ на длине h , а длина сваи H должна быть больше или равна рабочей длине сваи h . В этом случае реакция на конце сваи не возникает от нагрузки F .

Рис. 15. Расчетная схема работы сваи в грунте: τ — силы трения-сцепления грунта с поверхностью сваиFig. 15. Design diagram of the pile behaviour in the soil: τ — exposure of the pile surface to friction and cohesive forces arising in the soil

В качестве одного из вариантов работы сваи рассмотрим расчет надежности сваи по критерию несущей способности грунта основания для расчетной модели работы сваи в грунте по рис. 15, при $H > h$. Расчетная математическая модель предельного состояния висячей сваи на основании результатов многократных оценок рабочей длины пробной сваи h и ее испытаний, имеет вид $\tilde{h} \leq H$, где H — длина сваи; $\tilde{h}$ — случайная величина. Учитывая ограниченный объем результатов измерений деформаций ϵ_i материала сваи при нагружении ее предельной нагрузкой для определения значений h_p , будем $\tilde{h}$ рассматривать нечеткой переменной [52] и описывать функцией (26), при $X = \tilde{h}$. На рис. 16 представле-

на в графическом виде функция (26) для нечеткой переменной $\tilde{h} = X$, которая ограничена ординатой $\pi_X(x)$ при $x = H$ с учетом $a_x \leq H$, где $a_x = 0,5(h_{\max} + h_{\min})$ или $a_x = 0,5(X_{\max} + X_{\min})$, где $X_{\max}$ и $X_{\min}$ — значения измеренной рабочей длины пробной сваи.

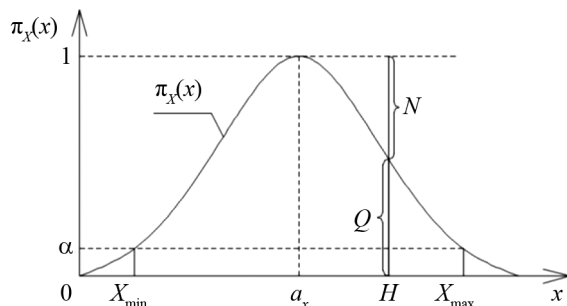


Рис. 16. Функция распределения $\pi_X(x)$ при $X = \tilde{h}$

Fig. 16. Distribution function $\pi_X(x)$ at $X = \tilde{h}$

Так как $a_x \leq H$, то возможность безотказной работы сваи по несущей способности грунта $R = 1$. Возможность отказа Q найдем при $x = H$, т.е.

$$Q = \exp \left[- \left(\frac{H - a_x}{b_x} \right)^2 \right] \text{ и } N = 1 - Q.$$

Пример 6. Пусть условно известна информация из результатов измерений $\tilde{h} = \{10, 11, 12\}$ м и $H = 12,5$ м. Нечеткая переменная $\tilde{h}$ описывается функцией (26). Примем $\alpha = 0,1$. Тогда имеем:

$$a_x = 0,5(12 + 10) = 11 \text{ м},$$

$$b_x = 0,5 \frac{(12 - 10)}{\sqrt{-\ln 0,1}} = 0,666 \text{ м},$$

т.к. $a_x = 11 \text{ м} < H = 12,5 \text{ м}$, то $R = 1$.

Возможность отказа

$$Q = \exp \left[- \left(\frac{12,5 - 11,0}{0,666} \right)^2 \right] = 0,0067, \quad N = 1 - Q = 0,9933.$$

Надежность сваи по несущей способности грунта характеризуется интервалом $[0,9933; 1]$.

Расчет надежности висячих свай по прочности грунта основания по СП 24.13330.2011

Сваи в существующих основаниях в большинстве случаев недоступны для их испытаний и оценки остаточной несущей способности, мерой которой служит наибольшее значение нагрузки, не приводящей сваю в предельное состояние по первой и второй группам предельных состояний, в соответствии с нормами СП 24.13330.2011 «Свайные основания». В связи с этим будет рассмотрен метод расчета надежности железобетонной висячей сваи по результатам испытаний одной или нескольких пробных свай на стадии проектирования, погружаемых в грунт на участке будущего основания фундамента,

на стадии эксплуатации вблизи объекта обследования. В данной работе будет рассмотрена проблема расчета надежности свай по критерию несущей способности грунта основания по расчетной схеме работы сваи, принятой нормативным документом СП 24.13330.2011 и изображенной на рис. 17. Общие вопросы теории надежности и методы расчетов надежности несущих элементов описаны в работах [46, 47, 53].

В труде [54] приведен единый подход к расчету надежности системы свайных фундаментов для одной сваи и групп свай — теория и калибровка коэффициента надежности. Также предложен единый целевой индекс надежности для проектирования одиночной сваи, группы свай без резервирования и группы свай с резервированием. Коэффициенты сопротивления для буронабивных и забивных свай были откалиброваны по статистическим результатам более 4000 испытаний свай. В работе [55] разработан робастный метод расчета свайного фундамента. Разработан вероятностный метод оптимизации свайного фундамента по критерию его стоимости. В публикации [56] представлен вероятностный расчет группы свай с учетом жесткости системы «основание-фундамент» и трехмерной пространственной изменчивости грунта. В исследовании [57] разработан метод расчета надежности одиночных свай и свайных кустов, основанный на испытаниях свай.

Несущая способность сваи по несущей способности грунта основания по СП определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{c,R} RA + u \sum_{i=1}^n \gamma_{c,f} f_i h_i \right), \quad (28)$$

значения параметров в (28) приведены выше.

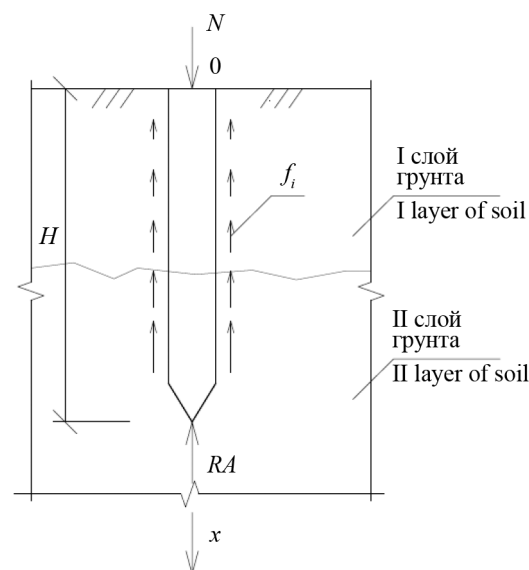


Рис. 17. Расчетная схема работы висячей сваи в грунте основания по СП

Fig. 17. Design diagram of the hanging pile behaviour in the foundation soil according to SP

Надежность сваячей сваи по несущей способности грунта основания определяется по математической модели предельного состояния:

$$N \leq \tilde{F}_d, \quad (29)$$

где N — фактическая расчетная нагрузка, передаваемая на сваю.

Волнистые линии над буквами обозначают, что они являются случайными величинами, как принято в теории надежности [46], которые принимают различные значения при их измерениях (определениях).

Ниже рассматривается метод расчета надежности сваячей сваи по несущей способности грунта многослойного основания. На практике такой вариант основания фундамента наиболее распространен. Значение расчетного сопротивления R грунта основания в СП устанавливается по результатам определения нормативного сопротивления R^u грунта, а последний — по результатам измерений объемного веса грунта, удельного сцепления грунта и ряда коэффициентов. Следовательно, первый член в правой части уравнения (28) будет случайной величиной. Силы трения-сцепления f_i также будут случайными величинами, так как находятся по результатам их измерений. В расчетах надежности коэффициенты условий работы, принятые в (28) по СП, не используются. Параметры A , u и h_i малоизменчивы и их можно принять детерминированными величинами. Тогда из формулы (28) имеем следующее выражение для предельной нагрузки по несущей способности грунта основания:

$$\tilde{F}_d = \tilde{R}A + u \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i h_i. \quad (30)$$

Нагрузку на сваю N на стадии эксплуатации можно определить многократными измерениями на существующих сваях, например методом, указанным в работе. На стадии проектирования N можно определить по результатам измерений N_i в подобных конструкциях или другими методами.

Математическая модель предельного состояния (30) примет вид:

$$\tilde{N} \leq \tilde{R}A + u \sum f_i h_i \quad (31)$$

Расчет надежности свая упрощается, если принять N в качестве расчетной (детерминированной) величины, о чем будет сказано далее.

По ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» расчет надежности рекомендовано проводить вероятностно-статистическим методом, если достаточна по объему статистическая информация о параметрах в расчетных моделях. На практике число результатов измерений контролируемых параметров в (31), как правило, мало и, следовательно, вероятностные методы расчетов надежности не применимы. В таких случаях можно использовать возможностный метод [47],

в котором случайные величины называются нечеткими переменными. Нечеткие переменные, например X , характеризуются функциями распределения $\pi_X(x)$ различного вида. На практике расчетов надежности часто используется функция распределения вида (26).

В обсуждении проблемы о расчете надежности ограничимся в статье тремя слоями грунта толщиной $h_i \leq 2$ м каждый, как требуется по СП. Сгруппируем нечеткие переменные в формуле (31) близкие по физической природе.

В этом случае выражение (31) представим в виде:

$$\tilde{N} - \tilde{R}A \leq u\tilde{f}_1 h_1 + u\tilde{f}_2 h_2 + u\tilde{f}_3 h_3, \quad (32)$$

Все члены в формуле (32) нечеткие переменные.

Введем обозначения: $\tilde{N} = X$, $\tilde{R}A = Y$, $u\tilde{f}_1 h_1 = Z_1$, $u\tilde{f}_2 h_2 = Z_2$, $u\tilde{f}_3 h_3 = Z_3$ и с учетом этого запишем (32) в виде:

$$X - Y \leq Z_1 + Z_2 + Z_3. \quad (33)$$

Правая часть (33) представляет сумму трех нечетких переменных, которая будет описываться одной нечеткой переменной Z , с параметрами $Z_{\min}$ из всех Z_i и $Z_{\max}$. Соответственно для Z имеем

$$a_z = 0,5(Z_{\max} + Z_{\min}), \quad b_z = 0,5 \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}, \quad \text{где } \alpha —$$

уровень среза, $\alpha \in [0,1]$. Левая часть (33) представляет разность двух нечетких переменных, в которой для свая $X > Y$. Разность нечетких переменных в (7) заменяется по правилам вычитания одной с $T_{\min} = X_{\min} - Y_{\max}$ и $T_{\max} = X_{\max} - Y_{\min}$. Тогда $a_t = 0,5(T_{\max} + T_{\min})$,

$$b_t = 0,5 \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}.$$

Если N принять расчетной (детерминированной), то расчет упростится, т.к. левая часть (33) будет содержать одну нечеткую величину Y , и $(X - Y)$ можно обозначить через T , и рассматривать как разность между детерминированной и нечеткой величиной в виде: $T_{\max} = N - Y_{\min}$ и $T_{\min} = N - Y_{\max}$.

Условие (31) запишется в виде:

$$T \leq Z, \quad (34)$$

Если в (34) окажется $a_t \leq a_z$, то возможность безотказной работы свая будет равна единице ($R = 1$). Возможность отказа Q при описании всех нечетких переменных в (34) функцией распределения вида (26) будет определяться по формуле

$$Q = \pi_T(t) = \exp \left[- \left(\frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$$

или

$$Q = \pi(z) = \exp \left[- \left(\frac{z - a}{b} \right)^2 \right],$$

как показано на рис. 18. Необходимость безотказной работы $N = 1 - Q$ (см. рис. 18).

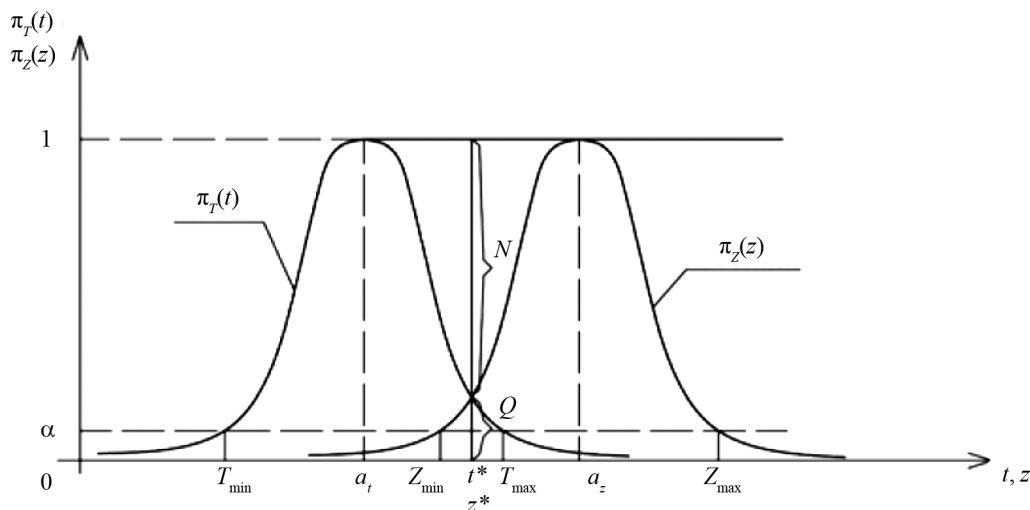


Рис. 18. Графическое представление решения условия $T \leq Z$

Fig. 18. Graphical representation of $T \leq Z$ condition solution

Для определения t^* или z^* абсциссы пересечения функций $\pi_t(t)$ и $\pi_z(z)$ находим из их равенства $\pi_t(t) = \pi_z(z)$, как показано на рис. 18, или из уравнения $\left| \frac{z^* - a_z}{b_z} \right| = \left| \frac{t^* - a_t}{b_t} \right|$, при $t^* = z^*$ (см. рис. 2). Значение t^* или z^* находим из всех корней уравнения при выполнении условия $a_t \leq t^* \leq a_z$, (см. рис. 18).

После определения t^* или z^* можно найти возможность отказа сваи Q . $Q = \exp \left[- \left(\frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$ или

$$Q = \exp \left[- \left(\frac{z^* - a_z}{b_z} \right)^2 \right].$$

Значение необходимости безотказной работы сваи по несущей способности грунта основания находим из $N = 1 - Q$ (см. рис. 18). Надежность свайчатой сваи по несущей способности грунта основания будет характеризоваться интервалом $[N; R]$. Сваи рассчитываются также по критерию прочности материала сваи и по ее осадке. Сваю можно рассматривать как условную последовательную механическую систему, в которой отказ по одному из условных элементов (прочности, осадки и несущей способности грунта основания) приводит к отказу всей системы (свай).

Предлагается следующий алгоритм расчета надежности сваи по несущей способности грунта основания. Задаются длиной сваи H при известных значениях размеров поперечного сечения. По результатам испытаний грунтов и пробной сваи в грунте основания измеряют значения высоты слоев грунта h . Делят их на слои $h_i \leq 2$ м в соответствии с требованиями СП 24.13330.2011. На середине слоев грунта измеряют значения сил трения f_i на поверхности сваи не менее трех раз существующими методами при «срыве» сваи и не менее трех

раз прочность грунта R под нижним концом сваи при заданной длине сваи H . По этим значениям и нагрузке на сваю проводят расчет ее надежности по критерию несущей способности грунта.

Учитывая малую статистическую информацию о контролируемых параметрах, расчет надежности построен на основе теории возможностей. В результате расчета удастся подобрать длину сваи в грунте основания, отвечающую требованиям уровня надежности (безопасности эксплуатации). Учитывая, что метод расчета длины сваи по надежности построен на основе существующих нормативных документов, предложенная методика может найти применение на практике расчетов свайчатых свай по надежности.

Рассмотрим на примере расчет надежности железобетонной свайчатой сваи по критерию несущей способности грунта основания для глинистых грунтов с показателем текучести 0,4 при $H = 6$ м, сечением 30×30 см².

Пример 7. Пусть известны $u = 1,6$ м и результаты измерений в виде значений $f_1 = \{17, 18, 19\}$ кПа, $f_2 = \{24, 25, 26\}$ кПа, $f_3 = \{28, 29, 30\}$ кПа, при $h_i = 2$ м, $\alpha = 0,01$. С учетом обозначения $uf_i(x)h_i = Z_i$, будем иметь $z_{1\max} = 45,6$ кН, $z_{1\min} = 40,8$ кН, $z_{2\max} = 62,4$ кН, $z_{2\min} = 57,6$ кН, $z_{3\max} = 72$ кН, $z_{3\min} = 67,2$ кН. Из этих значений по (33) находим по правилу сложения $Z_{\max} = 180$ кН, $Z_{\min} = 165,6$ кН. Отсюда по (33) имеем $a_z = 172,8$ кН, $b_z = 4,9$ кН. При $A = 0,09$ м² и $R = \{1800, 2000, 2100\}$ кПа при $RA = Y = \{162, 180, 189\}$ кН имеем $Y_{\max} = 189$ кН, $Y_{\min} = 162$ кН. Пусть $\tilde{N} = X = \{280, 330, 360\}$ кН, откуда $X_{\max} = 360$ кН, $X_{\min} = 280$ кН. Из Y и X формируем значения нечеткой переменной $T = X - Y$.

По правилам вычитания нечетких переменных, имеем $T_{\max} = 360 - 162 = 198$ кН, $T_{\min} = 280 - 189 =$

= 91 кН. Отсюда $a_t = 144,5$ кН, $b_t = 36,5$ кН. По полученным результатам формируем функции распределения $\pi_t(t)$ и $\pi_z(z)$ в виде: $\pi_t(t) = \exp\left[\left(\frac{t-144,5}{36,5}\right)^2\right]$,

$$\pi_z(z) = \exp\left[\left(\frac{z-172,8}{4,9}\right)^2\right].$$

Так как $a_t = 144,5 \leq a_z = 172,8$ кН, то возможность безотказной работы $R = 1$.

$$\text{Из } \left|\frac{t^* - 144,5}{36,5}\right| = \left|\frac{t^* - 172,8}{4,9}\right|, \text{ имеем } t^* = 169,4 \text{ кН,}$$

условие $a_t \leq t^* \leq a_z$ или $144,5 < 169,4 < 172,8$ выполняется. Возможность отказа сваи:

$$\begin{aligned} Q &= \exp\left[\left(\frac{t^* - 144,5}{36,5}\right)^2\right] = \\ &= \exp\left[\left(\frac{169,4 - 144,5}{36,5}\right)^2\right] = e^{-0,467} = 0,627. \end{aligned}$$

Необходимость безотказной работы $N = 0,373$.

Надежность сваи по критерию несущей способности грунта характеризуется интервалом $[0,373; 1]$. Надежность сваи мала. Задаемся большим значением длины свай $H = 8$ м, и расчет сваи повторяется.

Рассмотрим второй пример с теми же исходными данными, но нагрузку на сваю уменьшаем и принимаем в виде следующих значений: $\tilde{N} = X = \{240, 280, 320\}$ кН, при $RA = Y = \{162, 180, 189\}$ кН.

Для $N - RA$ или $X - Y = T$ имеем $T_{\max} = 320 - 162 = 158$ кН, $T_{\min} = 240 - 189 = 51$ кН. Отсюда $a_t = 104,5$ кН, $b_t = 71,5$ кН. С учетом результатов решения в первом примере имеем уравнение

$$\left|\frac{t^* - 104,5}{71,5}\right| = \left|\frac{t^* - 172,8}{4,9}\right|. \text{ Отсюда } t^* = 168,4 \text{ кН,}$$

условие $a_t \leq t^* \leq a_z$ выполняется.

Поскольку $a_t = 104,5$ кН $\leq a_z = 172,8$ кН, то $R = 1$.

$$Q = \exp\left[\left(\frac{168,4 - 104,5}{71,5}\right)^2\right] = e^{-0,795} = 0,00035.$$

$N = 0,99965$. $N = 0,99965$.

Надежность сваи возросла и характеризуется интервалом $[0,99965; 1]$. Если такая надежность сваи излишне большая, то длину сваи уменьшают. Нормативное значение надежности на сваю зависит от ответственности конструкции по безопасности. Этот вопрос находится в стадии изучения. Рассмотрим пример, в котором $N = 280$ кН и является детерминированной (расчетной). В этом случае $T_{\max} = 280 - 162 = 118$ кН, $T_{\min} = 280 - 189 = 91$ кН. Дальнейшее решение аналогично приведенному в примере.

Расчет надежности свай-стоек по СП 24.13330.2011

Для расчета надежности свай-стойки по каждому критерию ее работоспособности необходима математическая модель критерия (предельного состояния), которая формируется из расчетной схемы работы сваи в грунте основания, функции распределения случайных (контролируемых) величин математической модели, статистической информации о контролируемых параметрах (случайных величин) о зависимости (независимости) случайных величин.

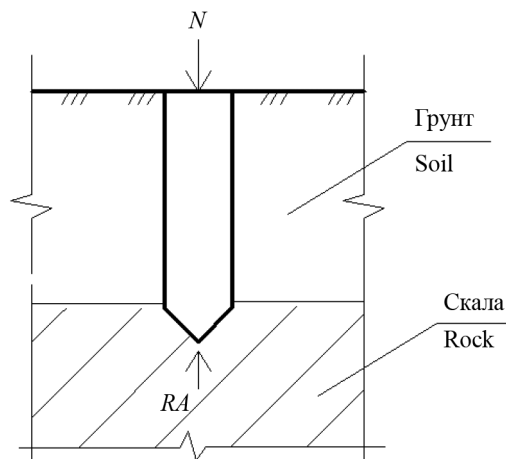


Рис. 19. Расчетная схема свай-стойки в грунте основания
Fig. 19. Design diagram of an end-bearing pile in the foundation soil

В расчетную схему сваи входят: N — нагрузка на сваю; R — расчетное сопротивление грунта основания; $F_d = RA$ — несущая способность сваи по грунту основания; A — площадь поперечного сечения сваи. По СП 24.13330.2011 математическая модель предельного состояния свай-стойки по несущей способности грунта основания представлена условием:

$$N \leq RA. \quad (35)$$

По несущей способности материала сваи имеем:

$$N \leq R_c A, \quad (36)$$

где R_c — расчетное сопротивление материала сваи.

Все параметры в выражениях (35) и (36) представлены в детерминированном виде, а фактически они получены из результатов измерений. В соответствии с основным постулатом метрологии любой результат при измерениях является случайным числом. Результат многократного измерения величины описывается методами математической статистики и теории вероятности. Такая величина называется случайной. Следовательно, N , R и R_c необходимо представить в форме случайных величин, а площадь поперечного сечения сваи A примем детерминированной величиной, т.к. изменчивость результа-

тов ее измерения мала. Тогда формулы (35) и (36) можно записать в виде:

$$N \leq \tilde{\sigma}_{г,пр} A, \text{ и } \tilde{N} \leq \tilde{\sigma}_{с,пр} A, \quad (37)$$

где $\tilde{\sigma}_{г,пр}$ — предельное напряжение грунта под нижним концом сваи (случайная величина); $\tilde{\sigma}_{с,пр}$ — предельное напряжение для материала сваи при сжатии.

В СП 24.13330.2011 «Свайные основания» работа сваи-стойки представлена стержнем с продольной сжимающей силой N , которая уравновешивается реакцией от грунта основания на нижнем конце сваи без учета сил трения-сцепления на боковой поверхности сваи (рис. 19).

Рассмотрим методы расчетов надежности свай-стоек по несущей способности грунта основания и материала сваи по расчетным математическим моделям (37) при обозначениях $\tilde{N} = X$, $\tilde{\sigma}_{г,пр} A = Y$, принятых в теории возможностей. Расчетная схема работы сваи-стойки в грунте основания представлена на рис. 19. Значение случайных величин X и Y , называемых в теории возможностей нечеткими переменными, находят путем их измерений. Так, нагрузку $\tilde{N} = X$ на сваю на стадии проектирования выявляют по показаниям динамометра нагружающего устройства при многократных нагружениях пробной сваи силой N , равной расчетному значению. На стадии эксплуатации рабочей сваи значение нагрузки N можно определить методом, описанным в Патенте на изобретение [26]. Предельное сжимающее напряжение грунта основания $\tilde{\sigma}_{г,пр}$ можно определить по ГОСТ 12374-66, динамическими или статическими испытаниями сваи. Сопротивление грунта $\tilde{\sigma}_{г,пр}$ под нижним концом сваи можно определить так же по формуле $\tilde{\sigma}_{г,пр} = 0,5q$, где q — значение сопротивления грунта проникновению наконечника зонда (СНиП Б.5-67). При $q < 5$ МПа слой грунта не может быть принят несущим для сваи-стойки. Способы измерения и определения напряжений в грунте можно найти в работе [58]. Значение $\tilde{\sigma}_{г,пр}$ под нижним концом сваи по СП 24.13330.2011 можно определить с помощью эталонной сваи или неразрушающими методами.

Расчет надежности сваи-стойки по несущей способности грунта основания по расчетной модели $X \leq Y$ при ограниченной статистической информации о X и Y можно провести с использованием теории возможностей. Нечеткие переменные будем характеризовать по исследованию функциями распределения возможностей вида (26).

На рис. 20 представлен вид функции $\pi_X(x)$ в виде двух графиков, внутри которых может располагаться множество возможных (неизвестных) функций распределения для описания нечеткой переменной X .

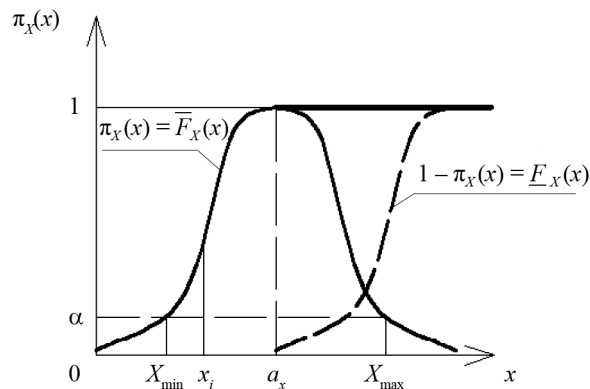


Рис. 20. Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ и ее границы: $F_X(x)$; $\bar{F}_X(x)$ — нижняя и верхняя границы функции распределения нечеткой переменной X

Fig. 20. Distribution function $\pi_X(x)$ and its limits: $F_X(x)$; $\bar{F}_X(x)$ — lower and upper limits of the distribution function of fuzzy variable X

Представим, что X — нечеткая переменная прочности. Найдем значение обеспеченности прочности при $X = x_i$, как показано на рис. 20. При значении $X = x_i$ имеем $a_x > x_i$ (см. рис. 20). В этом случае возможность обеспеченности прочности, например, бетона, характеризуется интервалом $[N; R]$ или в вероятностных обозначениях $[P; \bar{P}]$, где N — необходимость безотказной работы; R — возможность безотказной работы, а $[P; \bar{P}]$ — нижняя и верхняя границы вероятности безотказной работы.

Для модели (37) $X \leq Y$ графическое решение может быть представлено по рис. 21 для двух нечетких переменных.

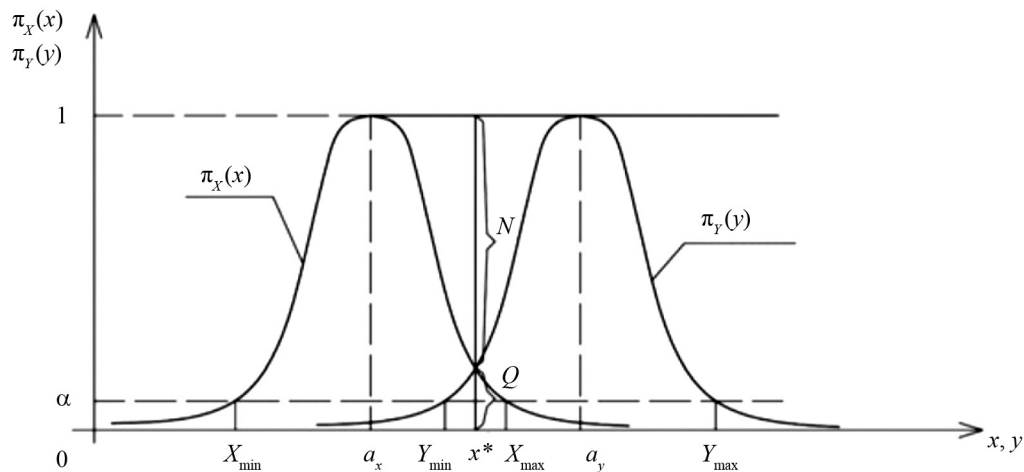
При $a_x \leq a_y$ имеем $R = 1$. Значение Q (возможность отказа) находят из $\pi_X(x)$ при x^* , значения которого находятся по точке пересечения функций $\pi_X(x)$ и $\pi_Y(y)$ или из $\left| \frac{x - a_x}{b_x} \right| = \left| \frac{y - a_y}{b_y} \right|$ при $x = y = x^*$.

Из всех корней уравнения выбирается то значение x^* , которое удовлетворяет условию $a_x \leq x^* \leq a_y$ (см. рис. 21).

Так представляется решение о расчете надежности по модели (37) в графическом виде. В аналитическом виде расчет проводят по формулам: находят $Q = \pi_X(x)$ при $x = x^*$ или $Q = \exp \left[- \left(\frac{x^* - a_x}{b_x} \right)^2 \right]$.

Отсюда $N = 1 - Q$ (см. рис. 21) и при $a_x < a_y$ имеем $R = 1$. Интервал надежности сваи-стойки по несущей способности грунта (по модели (37)) будет $[N; R]$ или $[P; \bar{P}]$.

Рассмотрим расчет надежности железобетонной сваи по критерию прочности материала сваи по математической модели предельного состояния вида:

Рис. 21. Графическое представление решения условия $X \leq Y$ Fig. 21. Graphical representation of $X \leq Y$ condition solution

$$\tilde{N} \leq \tilde{\varepsilon}_{b, \text{пр}} E_b A_b + \tilde{\varepsilon}_{s, \text{пр}} E_s A_s, \quad (38)$$

при предельном значении относительной деформации бетона меньше предельной деформации арматуры и с учетом гипотезы плоских сечений, как описано в труде [19]. Или по условию:

$$\tilde{N} \leq \tilde{\varepsilon}_{s, \text{пр}} E_b A_b + \tilde{\varepsilon}_{s, \text{пр}} E_s A_s, \quad (39)$$

при $\varepsilon_{b, \text{пр}} > \varepsilon_{s, \text{пр}}$.

В качестве предельной деформации (случайной величины) для стальной арматуры используется ее среднее значение $\varepsilon_{s, \text{пр}} = 0,002$, что соответствует пределу текучести стали. Для бетона при длительном нагружении по СП 63.13330.2012 $\varepsilon_{b, \text{пр}} = 0,0034$. Значения относительных деформаций бетона и арматуры находят по результатам испытаний образцов из бетона и арматуры на стадии эксплуатации неразрушающими методами. Результаты измерений являются случайными величинами. Будем их рассматривать нечеткими переменными и использовать в расчетах надежности теорию нечетких множеств [59]. Модули упругости бетона E_b и арматуры E_s примем детерминированными величинами. В стальной арматуре для E_s коэффициент вариации близок к 0,04, что позволяет не учитывать ее изменчивость и считать E_s детерминированной величиной.

Рассмотрим расчет надежности свай-стойки по расчетной модели (39). Представим (39) в виде:

$$\tilde{N} \leq \tilde{\varepsilon}_{s, \text{пр}} (E_b A_b + E_s A_s), \quad (40)$$

Обозначим $\tilde{N} = X$ и $\tilde{\varepsilon}_{s, \text{пр}} (E_b A_b + E_s A_s) = Y$. Тогда (40) примет вид $X \leq Y$. Алгоритм расчета надежности свай по формуле (40) будет таким же, как и по критерию несущей способности грунта основания.

В результате обоих расчетов (в последовательной системе) будем иметь два значения надежности в интервальной форме $[N_1; R_1]$ и $[N_2; R_2]$ или $[\underline{P}_1; \bar{P}_1]$ и $[\underline{P}_2; \bar{P}_2]$. По теории возможностей для

последовательной системы из нескольких независимых элементов окончательное значение надежности системы характеризуется интервалом, значения которого [52] определяются по значениям интервалов надежности «элементов» в виде:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^n \underline{P}_i - (n-1) \right\}, \\ \bar{P} = \min \bar{P}_i \end{cases}$$

где n — число значений $\underline{P}_i$ или интервалов. В расчете надежности свай-стойки $n = 2$.

Расчет надежности свай-стоек с учетом сил трения-сцепления на поверхности свай

В работах [10–12], опубликованных в последнее время, приведены иные представления и описание работы свай в грунтах оснований, которые еще не вошли в существующие нормативные документы. В публикации [8] приводится исследование возникновения и распределения сил трения-сцепления по боковой поверхности, подтверждающих иное распределение сил трения-сцепления. Для такого описания работы свай необходимо разработать новые методы расчета надежности и их включения в нормативную литературу, чему и будет способствовать данная статья. Предварительно на рис. 22 показана расчетная схема работы висячей свай и свай-стойки в грунте основания по СП 24.13330.2011.

Из расчетной схемы на рис. 22 видно, что силы трения-сцепления на боковой поверхности висячей свай увеличиваются из верхнего конца свай к нижнему. Такая работа свай наблюдается при движении («срыве») свай в грунте и обоснована ростом сил давления $q(x)$ на боковую поверхность свай к ее нижнему концу. В условиях отсутствия «срыва» свай-стойки, опирающейся в скальный грунт, по рис. 1 сила трения на поверхности свай не возникает и по СП 24.13330.2011 не предусмотрена в расчетах свай-стоек.

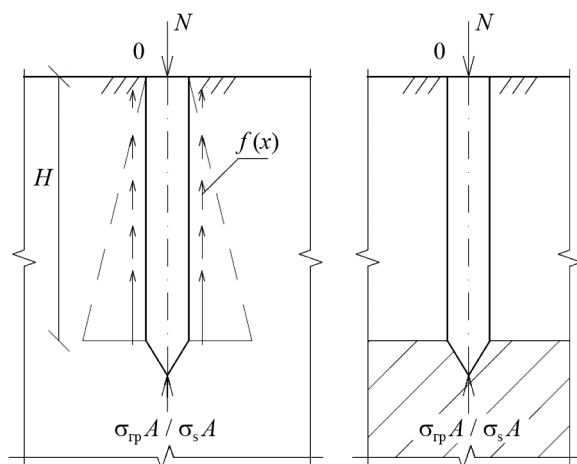


Рис. 22. Расчетные схемы работы свай и свай-стойки в грунте основания по СП 24.13330.2011

Fig. 22. Design diagrams of friction piles and end-bearing pile behaviour in the foundation soil according to SP (Code of Rules) 24.13330.2011

Учет работы грунта основания в сваях-стойках при расчете надежности по критерию несущей способности грунта основания и снижение отрицательных сил трения $f_{отр}(x)$ представляют практический интерес, так как выявляется резерв несущей способности грунта основания, более достоверно определяется надежность работы свай по этому критерию работоспособности и возможен экономический эффект при устройстве свайного основания.

Для разработки метода расчета надежности свай-стойки с учетом работы грунта, расположенного выше скального или малосжимаемого, предварительно рассмотрим работу свай-стойки в грунте основания. В отличие от существующего представления работы свай-стойки на практике мо-

гут реализовываться различные варианты работы свай-стойки в грунте основания после ее забивки (погружения в грунт) до скального или малосжимаемого грунта, представленные на рис. 23 после их нагружения различной по значению силой F .

Вариант по рис. 23, а соответствует малой нагрузке F_1 , большой длине свай или при глубоком залегании скального грунта. Вариант по схеме 23, b нагружен силой $F > F_1$, но меньше предельной нагрузки N_d по схеме рис. 2.10, с при полном использовании несущей способности грунта основания. Расчет надежности свай производится по математической модели предельного состояния вида $\bar{F} \leq \bar{N}_d$ в общем случае с учетом изменчивости F и N_d . Из условия равновесия сил по схеме 23, b имеем:

$$F = \sigma_{тр} A + u \int_0^h f(x) dx - u \int_h^H f_{отр}(x) dx. \quad (41)$$

Отрицательные силы трения-сцепления возникают вследствие деформаций материала свай от силы $\sigma_{тр} A$. При защите свай в нижнем конце от воздействия силы $f_{отр}(x)$, например при изоляции нижней части свай от грунта основания на участке длиной $(H - h)$, формула (41) представится в виде:

$$F = \sigma_{тр} A + u \int_0^h f(x) dx. \quad (42)$$

В дальнейшем будем рассматривать расчет надежности свай по варианту (42) ее работы.

Выражение предельной нагрузки N_d на сваю-стойку можно представить при $\sigma_{тр} = R_{тр}$ по аналогии с (41) в виде:

$$N_d = R_{тр} A + u \int_0^h f(x) dx - u \int_h^H f_{отр}(x) dx, \quad (43)$$

где $h_1 > h$, так как $N_d > F$, или по аналогии (42) в виде:

$$N_d = R_{тр} A + u \int_0^h f(x) dx. \quad (44)$$

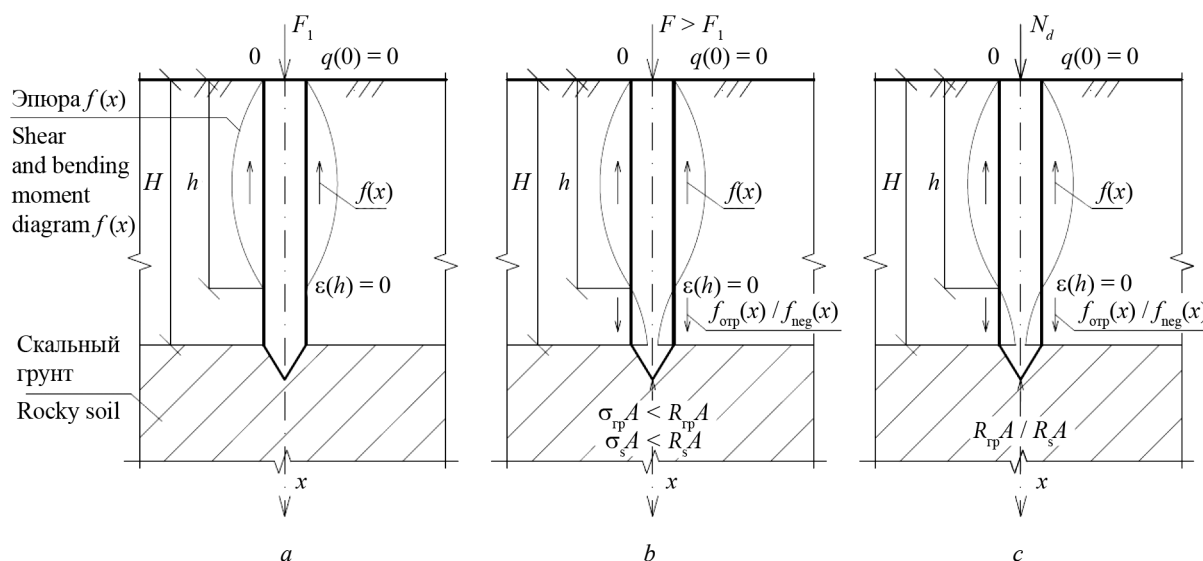


Рис. 23. Варианты работы свай-стойки в грунте основания

Fig. 23. Options of the end-bearing pile behaviour in the foundation soil

В выражении (40) имеем $\sigma_{гр}$ — напряжение в скальном или малосжимаемом грунте основания под нижним концом сваи, которое можно определить по результатам испытаний грунта или по испытаниям пробной сваи; u — периметр поперечного сечения сваи; A — площадь поперечного сечения сваи; h — высота слоя грунта, на длине которого действуют силы трения-сцепления $f(x)$ на поверхности сваи при напряжении $\sigma_{гр}$; h_1 — при напряжении $\sigma_{гр} = R_{гр}$. Силу трения-сцепления $f(x)$ с учетом непрерывности функций $\varepsilon(x)$ и $q(x)$ в дальнейшем будем представлять формулой, приведенной выше:

$$f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi. \quad (45)$$

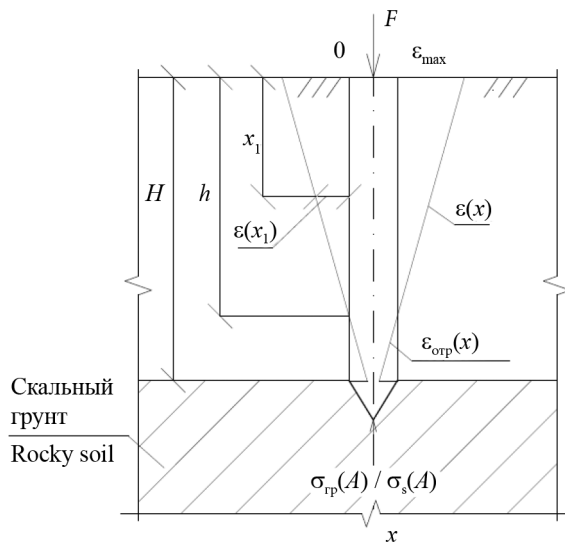


Рис. 24. Линейное представление изменения $\varepsilon(x)$ по длине сваи при нагрузке F

Fig. 24. Linear representation of $\varepsilon(x)$ change along the pile length in case of exposure to load F

Значение h (см. рис. 24) можно найти по результатам измерения $\varepsilon(x)$ при испытаниях пробной сваи в заданном (известном) сечении x_1 из условия

$$\varepsilon(x_1) = \varepsilon_{\max} \frac{h - x_1}{h}. \text{ Отсюда имеем:}$$

$$h = \frac{\varepsilon_{\max} x_1}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(x_1)}. \quad (46)$$

Безразмерный коэффициент φ определяется по результатам испытаний пробной сваи. Он зависит от вида сваи, способа ее погружения в грунт, от вида грунта основания. Из условия равновесия сил в пробной свае в грунте основания под нагрузкой F при известном h , по расчетной схеме (рис. 3) и по расчетной формуле (41) с учетом (43) можно найти значение φ для конкретной сваи, как будет показано далее на примере, по средним значениям h , E_c , γ , $\sigma_{гр}$. Значение E_c зависит от материала сваи. Для бетонов различного класса E_c можно найти в СП 63.13330.2012. Для краткости описа-

ния нахождения зависимости φ от других параметров рассмотрим формулу (41), где известны значения F , $\sigma_{гр}$, A , γ , h , E , x_1 . В результате получим

$$F = \sigma_{гр} A + u \int_0^h \left(\varepsilon_{\max} \frac{h-x}{h} \right) (\gamma \xi_0 x) \varphi dx. \text{ После инте-}$$

$$\text{грирования получим } F = \frac{\sigma_{гр} A + u \varepsilon_{\max} \gamma \xi_0 \varphi h^2}{6}.$$

Отсюда при средних значениях параметров в формуле F найдем значение φ :

$$\varphi = \frac{6(F - \sigma_{гр} A)}{u \varepsilon_{\max} \gamma \xi_0 h^2}. \quad (47)$$

Значение $\sigma_{гр}$ зависит от F , A , $\varepsilon_{\max} = \frac{F}{AE_c}$ и γ .

Значение γ находится по результатам испытаний грунта основания.

Рассмотрим порядок значения φ . Пусть известны значения $F = 1 \cdot 10^6$ Н; $\gamma = 20 \cdot 10^3$ Н/м³; $A = 0,09$ м²; $u = 1,2$ м; $\xi_0 = 0,1$; $h = 6$ м; крупный песок $\sigma_{гр} = 5 \cdot 10^6$ Па;

$$E_c = 30 \cdot 10^9 \text{ Па; } \varepsilon_{\max} = \frac{1 \cdot 10^6}{0,09 \cdot 30 \cdot 10^9} = 0,37 \cdot 10^{-3}.$$

$$\text{Тогда: } \varphi = \frac{6(1 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6 \cdot 0,09)}{1,2 \cdot 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 6^2} = 1 \cdot 10^5.$$

При $\varepsilon_{\max} > \varepsilon_{пр}$, где $\varepsilon_{пр}$ — предельное значение деформации материала сваи. Например, для металлических свай $\varepsilon_{пр} = 0,002$, для бетонных свай $\varepsilon_{пр} = 0,0015$.

Можно отметить ограниченность исследований по разработке методов расчета надежности работы свай-стоек по несущей способности грунта основания при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах, влияющих на значение надежности свай как количественной меры их эксплуатационной безопасности.

Для определения надежности свай-стойки по расчетной модели $\tilde{F} \leq \tilde{N}_d$ необходимо выявить параметры случайных величин и статистическую информацию о них. В расчетах надежности свай-стойки будем считать случайными величинами (нечеткими переменными в терминологии теории возможностей) на стадии проектирования параметры γ и $\tilde{h}$, а расчетную нагрузку F — заданной (детерминированной).

Выражение предельной несущей способности сваи по несущей способности грунта основания N_d находим по (44) с учетом изменчивости параметров γ и $\tilde{h}_1$ при нагрузке, равной N_d , как показано на рис. 25. В расчете надежности свай-стойки $f_{отр}(x)$ не учитываем благодаря изоляции сваи от грунта на длине $(H - h_1)$. Из рис. 24 видно, как найти зна-

$$\text{чение } h_1 = \frac{\varepsilon_{\max} x_1}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(x_1)} \text{ при } \varepsilon_{\max} = N_d / AE_c. \text{ Значение } N_d$$

можно найти испытаниями сваи по схеме (рис. 23, б) путем повышения нагрузки F до появления напряжения $\sigma_{пр}$ на нижнем конце сваи, равного $R_{гр}$

(при известном значении R_{rp}), либо по формуле (44) при $\sigma_{rp} = R_{rp}$ и $\varepsilon_{\max} = N_d / AE_c$. По рис. 23 видно, что F и σ_{rp} возрастают пропорционально до N_d и R_{rp} , и h до h_1 , как показано на рис. 25. По результатам измерений h_i по схемам (рис. 24 и 25) получим статистику для описания $\tilde{h}$ и h_1 в виде нечеткой переменной, как будет показано ниже. По результатам измерения γ_i получим статистику для описания нечеткой переменной $\tilde{\gamma}$.

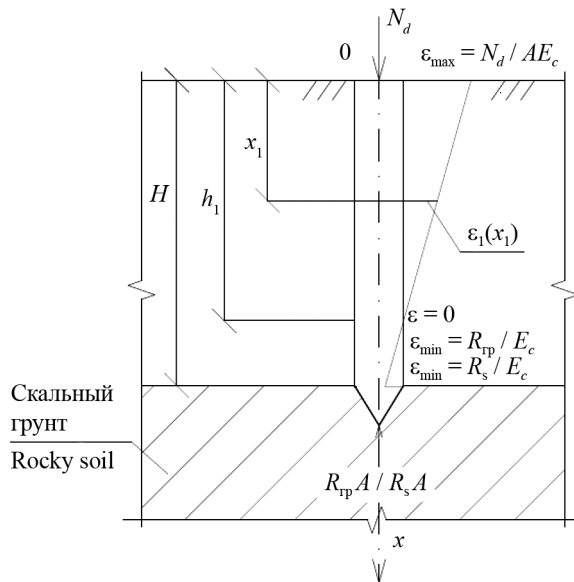


Рис. 25. Линейное представление изменения $\varepsilon(x)$ по длине сваи и измерения $\varepsilon_i(x_i)$ при нагрузке $\tilde{N}_d$

Fig. 25. Linear representation of $\varepsilon(x)$ change along the pile length and $\varepsilon_i(x_i)$ measurement in case of exposure to load $\tilde{N}_d$

В результате по выражению (44), после подстановки $f(x)$, можно записать

$$N_d = R_{rp}A + u \int_0^{h_1} \frac{N_d}{AE_c} \left(1 - \frac{x}{\tilde{h}_1}\right) (\tilde{\gamma} \xi_0 x) \varphi dx.$$

После интегрирования с учетом изменчивости

$$\tilde{\gamma}, \tilde{h}_1, \tilde{N}_d \text{ имеем } \tilde{N}_d = R_{rp}A + \frac{u \tilde{N}_d \tilde{\gamma} \xi_0 \varphi}{AE_c} \left(\frac{\tilde{h}_1^2}{2} - \frac{\tilde{h}_1^2}{3} \right).$$

$$\text{Отсюда } \tilde{N}_d \left(1 - \frac{u \tilde{\gamma} \xi_0 \varphi \tilde{h}_1^2}{6AE_c} \right) = R_{rp}A,$$

где R_{rp} — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи по СП 24.13330.2011 (не более 20 000 кПа). В результате имеем:

$$\tilde{N}_d = R_{rp}A / (1 - c \tilde{\gamma} \tilde{h}_1^2), \quad (48)$$

где

$$c = \frac{u \xi_0 \varphi}{6AE_c}. \quad (49)$$

По формуле (49) можно принять с детерминированной величиной при малой изменчивости E_c , A , u , φ . Значение R_{rp} можно найти по табл. 7.2 СП

24.13330.2011 в зависимости от вида скального или малосжимаемого грунта и глубины его залегания или определить испытаниями.

Рассмотрим возможный порядок значения с при $A = 0,09 \text{ м}^2$; $u = 1,2 \text{ м}$; $\varphi = 1 \cdot 10^5$; $\xi_0 = 0,1$; $E_c = 30 \cdot 10^9 \text{ Па}$. По выражению (49) имеем

$$c = \frac{1,2 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^5}{6 \cdot 0,09 \cdot 30 \cdot 10^9} = 7,4 \cdot 10^{-7} \text{ м/Н}.$$

По средним значениям $\bar{\gamma} = 20 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $\bar{h} = 7 \text{ м}$ и значениям $R_{rp} = 7,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (табл. 7.2 СП 24.13330.2011), $A = 0,09 \text{ м}^2$, $c = 7,4 \cdot 10^{-7} \text{ м/Н}$ и $N_d = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н}$, вычисленном при средних значениях параметров по (48). При нагрузке на сваю $F = 1 \cdot 10^6 \text{ Н}$, по существующим методам расчета, можно было бы сказать о достаточной несущей способности сваи по грунту основания, так как $N_d/F = 2,4 \cdot 10^6 / 1 \cdot 10^6 = 2,4$. Попробуем ее оценить количественно значением надежности по существующим понятиям.

Для расчета надежности сваи-стойки при расчетном значении F по расчетной модели $F \leq \tilde{N}_d$, где N_d определяется по (48), используем теорию возможностей, учитывая ограниченную по объему статистическую информацию о случайной величине $\tilde{N}_d$, которую будем называть нечеткой переменной и о $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{h}_1$. Расчетная нагрузка F , постоянное значение которой легко реализовать неизменной при испытаниях сваи, должна удовлетворять условию:

$$F \leq R_{rp}A / (1 - c \tilde{\gamma} \tilde{h}_1^2), \quad (50)$$

где статистика значений h_i выявляется измерениями h_i при испытаниях пробных свай с нагрузкой, равной F . Значение расчетного сопротивления грунта R_{rp} под нижним концом сваи-стойки, определяемое по табл. 7.2 СП 24.13330.2011 с учетом указаний СП по п. 7.2.1, примем детерминированной величиной. Значение «с» находим по (49). Нечеткую переменную $\tilde{\gamma}$ для однородного грунта будем характеризовать по результатам испытаний грунта основания. $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{h}_1$ будут по нечеткими переменными, которые будут описываться методами теории возможностей. Для их описания используем функцию распределения возможностей, например для X вида (26). Обратная функция (26) будет $x = a_x \pm b_x \sqrt{-\ln \alpha_x}$ или $x = a_x + b_x \beta$, где $\alpha_x = \pi_x(x)$ и $\alpha_x = \pi_x(x)$.

Обозначим $\tilde{\gamma} = X$, $\tilde{h}_1 = Y$. Из (50) имеем $F c \tilde{\gamma} \tilde{h}_1^2 \geq F - R_{rp}A$ или с учетом обозначений $F c \tilde{\gamma} = X$, $\tilde{h}_1 = Y$ и $F - R_{rp}A = d$ получим:

$$XY^2 \geq d. \quad (51)$$

Расчет надежности свай по расчетной модели (11) с учетом ограниченной статистической информации о X и Y можно представить на основе принципа обобщения Л. Заде. Для этого введем нечеткую переменную T , получаемую из (51) в виде:

$$T = XY^2 \geq d. \quad (52)$$

X и Y будем описывать функцией вида (10) с одним и тем же значением α .

Обратные функции от функции T по принципу Л. Заде будут:

$$t = (a_x - b_x \sqrt{-\ln \alpha_x})(a_y - b_y \sqrt{-\ln \alpha_x})^2 \geq d, \quad (53)$$

$$t = (a_x + b_x \sqrt{-\ln \alpha_x})(a_y + b_y \sqrt{-\ln \alpha_x})^2 \geq d. \quad (54^*)$$

В формуле (54) перед b ставят знак минус, так как с ростом этих членов t убывает. Обозначим $\sqrt{-\ln \alpha_x} = \beta$ и (55) представим для получения наименьшей расчетной надежности в виде:

$$t = (a_x - \beta b_x)(a_y - \beta b_y)^2 = d. \quad (55)$$

Из (55) находим $|\beta_{\min}|$ и соответственно возможность отказа $Q = \alpha_x = e^{-\beta_{\min}^2}$, необходимость безотказной работы $N = 1 - Q$. Возможность безотказной работы при $a_x a_y^2 \geq d$ равна $R = 1$. Надежность сваи характеризуется интервалом значений $[N, R]$.

Пример 8. Пусть известны (условно) значения исходных данных: $u = 1,2$ м; $A = 0,09$ м²; $E_c = 30 \times 10^9$ Па; $\xi_0 = 0,1$; $F = 1 \cdot 10^6$ Н, а также известны значения $X = \gamma_1 = [19, 20, 21] \cdot 10^3$ Н/м³, $Y = h_1 = [6-8]$ м. Найдем $c = 7,4 \cdot 10^{-7}$ М/Н при $\varphi = 1 \cdot 10^5$, $R_{\text{тп}} = 7,3 \times 10^6$ Па (крупный песок). $a_x = 20 \cdot 10^3$ Н/м³, $b_x = 0,47 \cdot 10^3$ Н/м³, $a_y = 7$ м, $b_y = 0,47$ м (при $\alpha = 0,1$) $d = 1 \cdot 10^6 - 7,3 \cdot 10^6 \cdot 0,09 = 0,343 \cdot 10^6$ Н, так как $a_x a_y^2 = 20 \cdot 10^3 \cdot 7^2 = 980 \cdot 10^3$ Н $> d = 0,343 \cdot 10^6$ Н. То возможность безотказной работы $R = 1$.

Из (55) имеем $(20 - 0,67\beta) \cdot 10^3 \cdot (7 - 0,67\beta)^2 = 343 \cdot 10^3$. Отсюда $\beta = -3,8$. Возможность отказа, $Q = e^{-3,8^2} = 0,9 \cdot 10^{-6}$, $N = 1 - Q$. Надежность сваи характеризуется интервалом значений: $[N, R]$.

В настоящее время предельные значения надежности несущих элементов зданий и сооружений, в том числе фундаментов и оснований находятся в стадии обсуждения и изучения. Так в работе [60] вероятность отказа фундамента в целом рекомендуется принимать $Q = 1 \cdot 10^{-6}/1 \cdot 10^{-5}$, что близко к результату примера.

Свая-стойка в понятиях теории надежности, как отмечалось выше, представляет условную последовательную механическую систему, элементами которой являются два критерия работоспособности: прочность сваи (несущая способность по материалу) и несущая способность сваи по грунту основания. Следовательно, ее надежность, как отдельного элемента, должна быть больше надежности фундамента, т.е. $Q < 10^{-6}$, что и отражено в примере. При расчете сваи-стойки с использованием теории возможностей и представления надежности в интервальной форме $[N, R]$ или в вероятностных показателях $[\underline{P}, \bar{P}]$, где $\underline{P}$, $\bar{P}$ — нижняя и верхняя вероятность безотказной работы, которые находятся по формулам $\underline{P} = \left\{ 0, \sum_{i=1}^n P_i - (n-1) \right\}$, $\bar{P} = \min \bar{P}_i$, которую иногда называют формулой «ограниченной разности».

Свайный фундамент в понятиях классической (вероятностной) теории надежности также представляет последовательную механическую систему (фундамент-свайное основание), в которой вероятность безотказной работы P равна произведению вероятностей $P_1 P_2$ всех элементов, а вероятность отказа $Q = 1 - \prod P_i$. В данной статье эта проблема не рассматривается. Также не рассмотрен метод расчета надежности сваи-стойки без изоляции нижней части сваи от грунта основания. Например, в буронабивных сваях-стойках такая изоляция затруднительна. Это свидетельствует о дальнейшей перспективе работы на другие виды расчетов надежности свай-стоек с использованием формул (43) и (44).

Дополнительную информацию по расчетам надежности свай можно найти в работах [61–63], а по новым подходам к распределению сил трения по боковой поверхности свай в [64–66].

Одним из дальнейших направлений в расчетах свай является также моделирование их работы с применением ЭВМ и конечно-элементных моделей [67–69]. Положения, рассмотренные в работе, могут быть применены для моделирования работы целевых фундаментов² [70–74].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа существующих методов расчета свай по всем критериям их работоспособности, предусмотренных СП 24.13330.2011, выявлены пути развития этих методов на повышение их достоверности и представлены результаты расчетов висячих свай и свай-стоек с элементами новизны в расчетах по несущей способности материала сваи, по несущей способности грунтов оснований и по расчетам осадки свай. Основой для расчетов свай послужило новое реальное представление о работе свай всех видов в грунте основания на стадии их эксплуатации. Расчетные схемы работы свай в грунте основания представлены из условия неподвижного состояния свай под нагрузкой и возникновения сил трения-сцепления на поверхности сваи в результате микроперемещений поверхностных слоев материала сваи в контакте с грунтом основания, противодействующих сжимающим или растягивающим нагрузкам на сваю. Такой подход к работе свай позволил отказаться от испытаний на «срыв» сваи и повысить достоверность результатов испытаний и на их основе результатов расчета свай по несущей способности грунта основания висячих свай и свай-стоек.

Впервые на основе результатов испытаний свай с получением ограниченной по объему статистической информации о контролируемых параметрах разработаны методы расчетов свай на надежность

² Рекомендации по проектированию и строительству целевых фундаментов. М.: НИИОСП Госстроя СССР: Изд-во стандартов, 1982. 53 с.

(безопасность эксплуатации) на базе полученных новых математических методов анализа информации ограниченного объема. Значение надежности характеризуется числовым интервалом, на основе которого можно принять его значение с учетом ответственности по безопасности проектируемого или эксплуатируемого объекта, и тем самым выполнить требования ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» даже для условий с неполной статистической информацией.

Согласно полученным результатам исследований и предложениям по расчетам свай, намечены пути по формированию новых разработок применительно к определению форм и размеров свай, к выбору их материалов, к методам испытаний свай на стадии строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Полученные результаты исследований и методы расчетов могут быть использованы в расче-

тах щелевых фундаментов глубокого заложения, опускных колодцев. Расчет несущей способности щелевых фундаментов с учетом распределения сил трения-сцепления по боковым поверхностям фундаментов рассмотрен авторами в статье

Особое значение результата научного обзора и приведенные методы расчетов свай имеют для свай большого диаметра и большой длины, как более ответственных конструкций. Дальнейшие исследования в работе должны быть направлены на выявление форм свай, учет отрицательных сил трения-сцепления при определении несущей способности, осадки и надежности свай, на учет многослойного грунта оснований, на разработку методов испытаний пробных свай и свай непосредственно в фундаментах зданий, а также работы свай в условиях вечной мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уткин В.С., Соловьев С.А. Определение остаточной несущей способности и надежности несущих элементов железобетонных конструкций на стадии эксплуатации. Вологда, 2019. 128 с.
2. Уткин В.С. Расчет несущей способности висячих свай по несущей способности грунта оснований с учетом отрицательных сил трения-сцепления // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 2 (9). С. 26–33.
3. Уткин В.С., Соловьев С.А. Уточнение теории расчета прочности железобетонной балки при изгибе // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства: сб. докладов Национальной науч.-практ. конф. 2018. С. 159–163.
4. Корепина И.А. Расчет щелевых фундаментов глубокого заложения по осадке // Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы межрегиональной научной конференции. В 2-х т. 2018. С. 159–163.
5. Соболева Е.В. Расчет буронабивных свай с уширениями // XII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы межрегиональной научной конференции. В 2-х т. 2018. С. 240–243.
6. Карпушова К.А. Расчет надежности сталежелезобетонной балки по критерию ширины раскрытия трещины // Молодые исследователи — регионам: материалы международной научной конференции. В 3-х т. / ответ. ред. А.А. Синицин. 2018. С. 312–314.
7. Корепина И.А. Молодые исследователи — регионам: материалы международной научной конференции. В 3-х т. / ответ. ред. А.А. Синицин. 2018. С. 314–316.
8. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422–428. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.004
9. Тер-Мартirosян З.Г., Чинь Т.В. Взаимодействие одиночной длинной сваи с двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 28–34.
10. Уткин В.С. Работа висячих свай в грунте основания фундамента и определение длины сваи // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 4. С. 23–26.
11. Уткин В.С. Работа и расчет висячих буронабивных свай в грунте основания и оптимизация устройства уширения // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 5. С. 63–66.
12. Уткин В.С. Расчет несущей способности свай-стоек с учетом трения сцепления на поверхности сваи // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. № 2. С. 1–7.
13. Yao M., Li J. Effect of the degradation of concrete friction piles exposed to external sulfate attack on the pile bearing capacity // Ocean Engineering. 2019. Vol. 173. Pp. 599–607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.038
14. Xu M., Ni P., Ding X., Mei G. Physical and numerical modelling of axially loaded bored piles with debris at the pile tip // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 114. Pp. 103–146. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103146
15. Tran K.T., McVay M., Herrera R., Lai P. A new method for estimating driven pile static skin friction with instrumentation at the top and bottom of the

pile // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011. Vol. 31. Issue 9. Pp. 1285–1295. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.05.007

16. *Tourlonias M., Bueno A., Bocquet R., Rossi R., Derler S.* Study of the friction mechanisms of pile surfaces: Measurement conditions and pile surface properties // *Wear*. 2015. Vol. 328–329. Pp. 100–109. DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.039

17. *Соколов Н.С., Рябинов В.Н.* Особенности устройства и расчета буронабивных свай с многосекционными уширениями // *Геотехника*. 2016. С. 60–64.

18. *Мангушев Р.А., Готман А.Л., Знаменский В.В.* Сваи и свайные фундаменты: конструкции, проектирование, технологии. М.: АСВ, 2015. 314 с.

19. *Байков В.Н., Сигалов Э.Е.* Железобетонные конструкции (Общий курс): учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 767 с.

20. *Zhou Z., Wang D., Zhang L.* Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422–428. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.004

21. *Chen P.Z., Luan M.T., Luo Q.* Parametric finite element analysis of effective pile-length in super-long and large-diameter pile groups // *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*. 2012. Vol. 29 (3). Pp. 307–311.

22. *Dai G.L., Yu Q.Y., Gong W.M.* Study of effective pile length based on winkler models // *Rock and Soil Mechanics*. 2012. Vol. 33 (S). Pp. 162–166.

23. *Leung Y.F., Klar A., Soga K.* Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. Vol. 136. Issue 2. Pp. 319–330. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000206

24. *Wang C., Chen X.Y.* Study of effective length of piles based on parabolic frictional resistance // *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*. 2010. Vol. 7. Issue 3. Pp. 509–512.

25. *Yang P.Z., Zhou Y.T., Sun W.J. et al.* Improved algorithm for effective length of deformable pile in compound foundation // *Journal of Lanzhou University of Technology*. 2014. Vol. 40. Issue 4. Pp. 120–123.

26. Пат. 2582495 МПК G01L. Способ измерения и мониторинга давления на бетон и кирпичные несущие стены и фундамент зданий и сооружений на заданном уровне на стадии эксплуатации / В.С. Уткин, Д.А. Тропина, Н.В. Горева. Патентообладатель: Вологодский государственный университет. Бюл. № 12, 27.04.2016.

27. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

28. *Уткин В.С., Соболева Е.В.* Деформационный метод расчета висячих свай по несущей способности грунта основания и технология устройства пробной буронабивной свай // *Современные техно-*

логии фундаментостроения: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф.. 2017. С. 38–41.

29. *Shakeel M., Ng C.W.W.* Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 96. Pp. 55–72. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.10.010

30. *Naghbi F., Fenton G.A., Griffiths D.V.* Prediction of pile settlement in an elastic soil // *Computers and Geotechnics*. 2014. Vol. 60. Pp. 29–32. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.03.015

31. *Xu M., Ni P., Mei G., Zhao Y.* Load-settlement behaviour of bored piles with loose sediments at the pile tip: Experimental, numerical and analytical study // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 102. Pp. 92–101. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.06.010

32. *Hong Y., Soomro M.A., Ng C.W.W.* Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunneling // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 64. Pp. 105–119. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.10.007

33. *Zhang Q., Zhang Z., He J.* A simplified approach for settlement analysis of single pile and pile groups considering interaction between identical piles in multilayered soils // *Computers and Geotechnics*. 2010. Vol. 37. Issues 7–8. Pp. 969–976. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.08.003

34. *Haberfeld C.M., Lochaden A.L.E.* Analysis and design of axially loaded piles in rock // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 3. Pp. 535–548. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.10.001

35. *Patton F.D.* Multiple modes of shear failure in rock Proceedings of the 1st congress International society for rock mechanics // *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM)*. Lisbon, 1966. Pp. 509–513.

36. *Lam T.S.K., Johnston I.W.* Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints — Evaluation // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1989. Vol. 115. Issue 5. Pp. 728–740. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1989)115:5(728)

37. *Huang T., Zheng J., Gong W.* The Group Effect on Negative Skin Friction on Piles // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 116. Pp. 802–808. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.367

38. *Chen R.P., Zhou W.H., Chen Y.M.* Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile // *Computers and Geotechnics*. 2009. Vol. 36. Issue 8. Pp. 1265–1271. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.05.011

39. *Comodromos E.M., Bareka S.V.* Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis // *Computers and Geotechnics*. 2005. Vol. 32. Issue 3. Pp. 210–221. DOI: 10.1016/j.compgeo.2005.01.006

40. *Poorooshasb H.B., Alamgir M., Miura N.* Negative skin friction on rigid and deformable piles // *Computers and Geotechnics*. 1996. Vol. 18. Issue 2. Pp. 109–126. DOI: 10.1016/0266-352x(95)00026-7
41. *El-Mossallamy Y.M., Hefny A.M., Demerdash M.A., Morsy M.S.* Numerical analysis of negative skin friction on piles in soft clay // *HBRC Journal*. 2013. Vol. 9. Issue 1. Pp. 68–76. DOI: 10.1016/j.hbrj.2013.02.006
42. *Метелюк Н.С., Шишко Г.Ф., Соловьева А.Б. и др.* Сваи и свайные фундаменты (справочное пособие). Киев : Будивельник, 1977. 256 с.
43. *Li J.P., Zhang J., Liu S.N., Juang C.H.* Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China // *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55. Pp. 637–649. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.04.014
44. *Suzuki M., Ishii K.* Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment // *Structural Safety*. 1994. Vol. 14. Issue 1–2. Pp. 47–59. DOI: 10.1016/0167-4730(94)90006-x
45. *Leung Y.F., Lo M.K.* Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.07.010
46. *Райзер В.Д.* Теория надежности сооружений. М. : АСВ, 2010. 384 с.
47. *Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А.* Расчет надежности грунтовых оснований зданий и сооружений при реконструкции // *Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений*. 2016. № 3. С. 51–58.
48. *Shahin M.A.* State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations // *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7. Issue 1. Pp. 33–44. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.002
49. *Bateni S.M., Jeng D.S.* Estimation of pile group scour using adaptive neuro-fuzzy approach // *Ocean Engineering*. 2007. Vol. 34. Issue 8–9. Pp. 1344–1354. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.07.003
50. *Elnikhely E.A.* Minimizing scour around bridge pile using holes // *Ain Shams Engineering Journal*. 2016. Vol. 8. Issue 4. Pp. 499–506. DOI: 10.1016/j.asej.2016.06.016
51. *Beheshti A.A., Ataie-Ashtiani B.* Discussion of “Neuro-fuzzy GMDH systems based evolutionary algorithms to predict scour pile groups in clear water conditions” by M. Najafzadeh // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 123. Pp. 249–252. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.005
52. *Дюбуа А., Прад А.* Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / пер. с франц. М. : Радио и связи, 1990. 288 с.
53. *Гарагаиш Б.А.* Надежность пространственных регулируемых систем «Основание-сооружение» при неравномерных деформациях основания. В 2-х т. М. : АСВ, 2012. 416 с.
54. *Oduah F., El Naggar M., Norlander G.* Unified system reliability approach for single and group pile foundations — Theory and resistance factor calibration // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 108. Pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.003
55. *Ravichandran N., Shrestha S., Piratla K.* Robust design and optimization procedure for piled-raft foundation to support tall wind turbine in clay and sand // *Soils and Foundations*. 2018. Vol. 58. Issue 3. Pp. 744–755. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.02.027
56. *Leung Y.F., Lo M.K.* Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.07.010
57. *Huang J., Kelly R., Li D., Zhou C., Sloan S.* Updating reliability of single piles and pile groups by load tests // *Computers and Geotechnics*. 2016. Vol. 73. Pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.12.003
58. *Землянский А.А.* Обследование и испытание зданий и сооружений. М. : АСВ, 2004. 240 с.
59. *Zadeh L.* Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. Vol. 1. Issue 1. Pp. 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5
60. *Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Хотенко С.Н.* Обследование и испытание зданий и сооружений: учеб. для вузов / под ред. В.И. Римшина. 3-е изд., стер. М. : Высшая школа, 2007. 655 с.
61. *Ivanova T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., Shulman S.G.* The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 7. Issue 67. Pp. 3–12. DOI: 10.5862/mce.67.1
62. *Альберт И.У., Ивашинов Д.А., Шульман С.Г.* Определение прогибов и углов поворота одиночной свай с учетом случайного характера параметров системы свая-грунтовое основание // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2017. Т. 286. С. 35–42.
63. *Jiang C., Li T.-B., Zhou K.-P., Chen Z., Chen L., Zhou Z.-L. et al.* Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. Issue 7. Pp. 1955–1964. DOI: 10.1016/s1003-6326(16)64306-6
64. *Shi Jianyong Q.L.* Researches on distribution of frictional resistance and effective length of flexible pile under rigid foundation // *Industrial Construction*. 2007. No. 11. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GYJZ200711017.htm
65. *Xu L., Cai F., Pan J., Xue Y.* Generalized nonlinear model describing softening and hardening behaviors of skin friction for axially loaded piles // *Computers*

and Geotechnics. 2019. Vol. 116. Pp. 183–196. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103196

66. Xu L., Shao W., Hue Y., Cai F., Li Y. A simplified piecewise-hyperbolic softening model of skin friction for axially loaded piles // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 108. Pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.018

67. Hamderi M. Comprehensive group pile settlement formula based on 3D finite element analyses // Soils and Foundations. 2018. Vol. 58. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.11.012

68. Soomro M.A., Mangnejo D.A., Bhanbhro R. 3D finite element analysis of pile responses to adjacent excavation in soft clay: Effects of different excavation depths systems relative to a floating pile // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 86. Pp. 138–155. DOI: 10.1016/j.tust.2019.01.012

69. Li G., Motamed R. Finite element modeling of soil-pile response subjected to liquefaction-induced lateral spreading in a large-scale shake table experiment // Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

2017. Vol. 92. Pp. 573–584. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.11.001

70. Павлов В.В., Аверьянова Л.А., Алексеев Б.Г. Щелевые фундаменты зданий. М. : Стройиздат, Красноярский отдел, 1992. 141 с.

71. Иванов А.А. Оценка несущей способности оснований щелевых фундаментов на основе анализа напряженного состояния грунтового массива и экспериментальных данных : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 28 с.

72. Сорочан Е.А., Ревозаишвили Р.Г. Исследование работы щелевых фундаментов // ОФМГ. 1986. № 5.

73. Корепина И.А. Разработка метода расчета щелевых фундаментов // Материалы межрегиональной научной конференции XI Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых. ВоГУ, 2017. С. 253–259.

74. Уткин В.С., Корепина И.А. Расчет щелевых фундаментов по несущей способности грунта основания и его эффективная глубина заложения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 6. С. 44–52.

Поступила в редакцию 3 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 25 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

Об авторах: **Владимир Сергеевич Уткин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленное и гражданское строительство; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 458724; utkinvogtu@mail.ru;

Сергей Александрович Соловьев — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленное и гражданское строительство; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57191529586, ORCID: 0000-0001-7083-7963; ser6sol@yandex.ru.

REFERENCES

1. Utkin V.S., Solov'ev S.A. *Determination of the residual bearing capacity and reliability of the bearing elements of reinforced concrete structures at the operational stage*. Vologda, 2019; 128. (rus.)

2. Utkin V.S. Calculation of the bearing capacity of hanging piles according to the bearing capacity of the soil of the bases, taking into account the negative friction-adhesion forces. *Housing*. 2019; 2(9):26-33. (rus.)

3. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Refinement of the theory of calculating the strength of a reinforced concrete beam in bending. Actual problems of science and practice in various sectors of the economy. *Collection of reports of the National Scientific and Practical Conference*. 2018; 159-163. (rus.)

4. Korepina I.A. Calculation of slotted foundations of deep laying in sediment. *Annual scientific session of graduate students and young scientists: materials of the interregional scientific conference*. In 2 volumes. 2018; 159-163. (rus.)

5. Soboleva E.V. Calculation of bored piles with broadening. *XII Annual Scientific Session of Graduate Students and Young Scientists: materials of the interregional scientific conference*. In 2 volumes. 2018; 240-243. (rus.)

6. Karpushova K.A. Reliability calculation of steel-reinforced concrete beam according to the criterion of the width of the crack opening. *Young researchers — to the regions: materials of the international scientific conference*. In 3 volumes / Executive Editor A.A. Sinitsin. 2018; 312-314. (rus.)

7. Korepina I.A. Young researchers — to the regions. *Materials of the international scientific conference*. In 3 volumes / Executive Editor A.A. Sinitsin. 2018; 314-316. (rus.)

8. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015; 2(6):422-428. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.004

9. Ter-Martirosyan Z.G., Chin' T.V. Interaction of a single long pile with a two-layer base, taking into account the compressibility of the pile shaft. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 4:28-34. (rus.).
10. Utkin V.S. The work of hanging piles in the soil of the foundation base and determining the length of the pile. *Structural Mechanics and Structural Analysis*. 2017; 4:23-26. (rus.)
11. Utkin V.S. Work and calculation of hanging bored piles in the foundation soil and optimization of the broadening device. *Structural Mechanics and Structural Analysis*. 2017; 5:63-66. (rus.)
12. Utkin V.S. Calculation of the bearing capacity of piles, taking into account the friction of adhesion on the surface of the pile. *Construction: Science and Education*. 2019; 9(2):1-7. (rus.)
13. Yao M., Li J. Effect of the degradation of concrete friction piles exposed to external sulfate attack on the pile bearing capacity. *Ocean Engineering*. 2019; 173:599-607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.038
14. Xu M., Ni P., Ding X., Mei G. Physical and numerical modelling of axially loaded bored piles with debris at the pile tip. *Computers and Geotechnics*. 2019; (114):103-146. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103146
15. Tran K.T., McVay M., Herrera R., Lai P. A new method for estimating driven pile static skin friction with instrumentation at the top and bottom of the pile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011; 31(9):1285-1295. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.05.007
16. Tournonias M., Bueno A., Bocquet R., Rossi R., Derler S. Study of the friction mechanisms of pile surfaces: Measurement conditions and pile surface properties. *Wear*. 2015; 328-329:100-109. DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.039
17. Sokolov N.S., Ryabinov V.N. Features of the device and calculation of injection piles with multi-seat broadening. *Geotechnics*. 2016; 60-64. (rus.)
18. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskiy V.V. *Piles and pile foundations: structures, design, technologies*. Moscow, ASV, 2015; 314. (rus.)
19. Baykov V.N., Sigalov E.E. *Reinforced concrete structures (General course)*. Textbook for universities. 5th ed., Revised. and add. Moscow, Stroyizdat, 1991; 767. (rus.)
20. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015; 2(6):422-428.
21. Chen P.Z., Luan M.T., Luo Q. Parametric finite element analysis of effective pile-length in super-long and large-diameter pile groups. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*. 2012; 29(3):307-311.
22. Dai G.L., Yu Q.Y., Gong W.M. Study of effective pile length based on winkler models. *Rock and Soil Mechanics*. 2012; 33(S):162-166.
23. Leung Y.F., Klar A., Soga K. Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010; 136(2):319-330. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000206
24. Wang C., Chen X.Y. Study of effective length of piles based on parabolic frictional resistance. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*. 2010; 7(3):509-512.
25. Yang P.Z., Zhou Y.T., Sun W.J. et al. Improved algorithm for effective length of deformable pile in compound foundation. *Journal of Lanzhou University of Technology*. 2014; 40(4):120-123.
26. Pat. No. 2582495 MPK GOJL. The method of measuring and monitoring the pressure on concrete and brick bearing walls and the foundation of buildings and structures at a given level at the operational stage / V.S. Utkin, D.A. Tropina, N.V. Goreva. Patentee: Vologda State University. Bul. No. 12, 27.04.2016. (rus.)
27. Tsytoovich N.A. *Soil mechanics*. Moscow, High School, 1983; 288. (rus.)
28. Utkin V.S., Soboleva E.V. The deformation method for calculating suspended piles according to the bearing capacity of the soil of the base and the technology for constructing a trial bored pile. *Collection of reports "Modern foundation engineering" of the International scientific and technical conference*. 2017; 38-41. (rus.)
29. Shakeel M., Ng C.W.W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. *Computers and Geotechnics*. 2018; 96:55-72. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.10.010
30. Naghibi F., Fenton G.A., Griffiths D.V. Prediction of pile settlement in an elastic soil. *Computers and Geotechnics*. 2014; 60:29-32. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.03.015
31. Xu. M., Ni P., Mei G., Zhao Y. Load-settlement behaviour of bored piles with loose sediments at the pile tip: Experimental, numerical and analytical study. *Computers and Geotechnics*. 2018; 102:92-101. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.06.010
32. Hong Y., Soomro M.A., Ng C.W.W. Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunneling. *Computers and Geotechnics*. 2015; 64:105-119. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.10.007
33. Zhang Q., Zhang Z., He J. A simplified approach for settlement analysis of single pile and pile groups considering interaction between identical piles in multilayered soils. *Computers and Geotechnics*. 2010; 37(7-8):969-976. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.08.003
34. Haberfield C.M., Lochaden A.L.E. Analysis and design of axially loaded piles in rock. *Journal*

of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019; 11(3):535-548. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.10.001

35. Patton F.D. Multiple modes of shear failure in rock Proceedings of the 1st congress International society for rock mechanics. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM)*. Lisbon, 1966; 509-513.

36. Lam T.S.K., Johnston I.W. Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints — Evaluation. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1989; 115(5):728-740. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1989)115:5(728)

37. Huang T., Zheng J., Gong W. The Group Effect on Negative Skin Friction on Piles. *Procedia Engineering*. 2015; 116:802-808. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.367

38. Chen R.P., Zhou W.H., Chen Y.M. Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile. *Computers and Geotechnics*. 2009; 36(8):1265-1271. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.05.011

39. Comodromos E.M., Bareka S.V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis. *Computers and Geotechnics*. 2005; 32(3):210-221. DOI: 10.1016/j.compgeo.2005.01.006

40. Poorooshab H.B., Alamgir M., Miura N. Negative skin friction on rigid and deformable piles. *Computers and Geotechnics*. 1996; 18(2):109-126. DOI: 10.1016/0266-352x(95)00026-7

41. El-Mossallamy Y.M., Hefny A.M., Demerdash M.A., Morsy M.S. Numerical analysis of negative skin friction on piles in soft clay. *HBRC Journal*. 2013; 9(1):68-76. DOI: 10.1016/j.hbrej.2013.02.006

42. Metelyuk N.S., Shishko G.F., Solov'eva A.B. et al. *Piles and pile foundations (reference guide)*. Kiev, Budivelnik, 1977; 256. (rus.).

43. Li J.P., Zhang J., Liu S.N., Juang C.H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China. *Soils and Foundations*. 2015; (55):637-649. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.04.014

44. Suzuki M., Ishii K. Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment. *Structural Safety*. 1994; 14(1-2):47-59. DOI: 10.1016/0167-4730(94)90006-x

45. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*. 2018; 103:193-200. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.07.010

46. Rayzer V.D. *Reliability Theory*. Moscow, ASV, 2010; 384. (rus.).

47. Utkin V.S., Solov'ev S.A., Kaberova A.A. Calculation of the reliability of the soil foundations of buildings and structures during reconstruction. *Seismic construction. Building Safety*. 2016; 3:51-58. (rus.)

48. Shahin M.A. State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile founda-

tions. *Geoscience Frontiers*. 2016; 7(1):33-44. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.002

49. Bateni S.M., Jeng D.S. Estimation of pile group scour using adaptive neuro-fuzzy approach. *Ocean Engineering*. 2007; 34(8-9):1344-1354. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.07.003

50. Elnikhely E.A. Minimizing scour around bridge pile using holes. *Ain Shams Engineering Journal*. 2016; 8(4):499-506. DOI: 10.1016/j.asej.2016.06.016

51. Beheshti A.A., Ataie-Ashtiani B. Discussion of "Neuro-fuzzy GMDH systems based evolutionary algorithms to predict scour pile groups in clear water conditions" by M. Najafzadeh. *Ocean Engineering*. 2016; 123:249-252. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.005

52. Dyubua A. Prad A. *Theory of Opportunities. Application to the representation of knowledge in computer science* / translated from French. Moscow, Radio and communications, 1990; 288. (rus.).

53. Garagash B.A. *Reliability of the spatial regulated systems "Base-structure" with uneven deformations of the base in two volumes*. Moscow, ASV, 2012; 416. (rus.).

54. Oduah F., El Naggar M., Norlander G. Unified system reliability approach for single and group pile foundations — Theory and resistance factor calibration. *Computers and Geotechnics*. 2019; 108:173-182. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.003

55. Ravichandran N., Shrestha S., Piratla K. Robust design and optimization procedure for piled-raft foundation to support tall wind turbine in clay and sand. *Soils and Foundations*. 2018; 58(3):744-755. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.02.027

56. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*. 2018; 103:193-200. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.07.010

57. Huang J., Kelly R., Li D., Zhou C., Sloan S. Updating reliability of single piles and pile groups by load tests. *Computers and Geotechnics*. 2016; 73:221-230. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.12.003

58. Zemlyanskiy A.A. *Inspection and testing of buildings and structures*. Moscow, ASV, 2004; 240. (rus.).

59. Zadeh L. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978; 1(1):3-28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5

60. Kozachek, V.G., Nechaev N.V., Notenko S.N. *Inspection and testing of buildings and structures. A textbook for universities* / ed. by V.I. Rimshina. 3rd edition. Moscow, High School, 2007; 655. (rus.).

61. Ivanova T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., Shulman S.G. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 7(67):3-12. DOI: 10.5862/mce.67.1

62. Al'bert I.U., Ivashintsov D.A., Shul'man S.G. Determination of deflections and turning angles of a single pile, taking into account the random nature of the parameters of the pile-soil base system. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneeva*. 2017; 286:35-42. (rus.).
63. Jiang C., Li T.-B., Zhou K.-P., Chen Z., Chen L., Zhou Z.-L. et al. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016; 26(7):1955-1964. DOI: 10.1016/s1003-6326(16)64306-6
64. Shi Jianyong Q.L. Researches on distribution of frictional resistance and effective length of flexible pile under rigid foundation. *Industrial Construction*. 2007; 11. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFD-TOTAL-GYJZ200711017.htm
65. Xu L., Cai F., Pan J., Xue Y. Generalized non-linear model describing softening and hardening behaviors of skin friction for axially loaded piles. *Computers and Geotechnics*. 2019; 116:183-196. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103196
66. Xu L., Shao W., Hue Y., Cai F., Li Y. A simplified piecewise-hyperbolic softening model of skin friction for axially loaded piles. *Computers and Geotechnics*. 2019; 108:7-16. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.018
67. Hamderi M. Comprehensive group pile settlement formula based on 3D finite element analyses. *Soils and Foundations*. 2018; 58(1):1-15. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.11.012
68. Soomro M.A., Mangnejo D.A., Bhanbhro R. 3D finite element analysis of pile responses to adjacent excavation in soft clay: Effects of different excavation depths systems relative to a floating pile. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019; 86:138-155. DOI: 10.1016/j.tust.2019.01.012
69. Li G., Motamed R. Finite element modeling of soil-pile response subjected to liquefaction-induced lateral spreading in a large-scale shake table experiment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017; 92:573-584. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.11.001
70. Pavlov V.V., Aver'yanova L.A., Alekseev B.G. *Crevice foundations of buildings*. Moscow, Stroyizdat, Krasnoyarsk Department, 1992; 141. (rus.).
71. Ivanov A.A. *Assessment of the bearing capacity of the foundations of slotted foundations based on the analysis of the stress state of the soil mass and experimental data : abstract. dis. Ph.D.* Volgograd, 2013; 28. (rus.).
72. Sorochan E.A., Revozashvili R.G. Study of the work of slotted foundations. *FFSM*. 1986; 5. (rus.).
73. Korepina I.A. Development of a method for calculating slotted foundations. *Materials of the interregional scientific conference of the XI Annual scientific session of graduate students and young scientists*. 2017; 253-259. (rus.).
74. Utkin V.S., Korepina I.A. Calculation of slotted foundations according to the bearing capacity of the soil of the base and its effective depth. *Earthquake-resistant construction. Building Safety*. 2018; 6:44-52. (rus.).

Received March 3, 2020.

Adopted in a revised form on March 25, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Vladimir S. Utkin** — Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of Industrial and Civil Engineering Department; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 458724; utkinvogtu@mail.ru;

Sergey A. Solovyev — Candidat Technical Science, Associate Professor of Department of Industrial and Civil Engineering Department; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 821778, Scopus: 57191529586, ORCID: 0000-0001-7083-7963; ser6sol@yandex.ru.

Исследование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости бетона

Л.Н. Талипов, Е.Г. Величко, В.С. Семенов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Коррозия арматуры в бетоне конструкций имеет достаточно затратные последствия для экономики любой страны. Действующие нормативные документы предлагают два основных направления — первичная и вторичная защита. Одно из перспективных направлений методов первичной защиты — применение комплексных антикоррозионных добавок в составе бетонов, в силу своей технологической простоты и экономической эффективности. Как компоненты таких добавок, особый интерес представляют пассиваторы и поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве пассиватора предложен нитрит натрия, в качестве ПАВ — молекулы поликарбоксилатов (PCE). У добавки нитрита натрия совместно с PCE визуально установлен синергетический эффект.

Материалы и методы. Идентификация структурных характеристик молекул полученных полимеров PCE определялась методами эксклюзионной гель-проникающей хроматографии и ЯМР ^{13}C спектроскопией. Для исследования синергетического эффекта добавки $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ образцы стали выдерживались в моделях поровой жидкости, после чего морфологию их поверхности изучали методами электронной сканирующей микроскопии и энергетического рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты. Текстура и цвет поверхности представленных микрофотографий свидетельствуют о поверхностных образованиях на образцах, выдержанных в моделях поровой жидкости с разными антикоррозионными добавками. Рентгеноспектральный микроанализ показал повышенное содержание углерода, кислорода и натрия на поверхности образцов, выдержанных в моделях поровой жидкости бетона с добавлением комплексной антикоррозионной добавки нитрита натрия и PCE, что говорит о повышенных концентрациях PCE и о возможном повышенном pH на поверхности стали. На основании полученных данных предложен механизм образования защитного пленочного слоя при действии комплексной антикоррозионной добавки $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$.

Выводы. Обоснование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости бетона открывает перспективы для исследования таких добавок в модели бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комплексная антикоррозионная добавка, защита арматуры, нитрит натрия, поровая жидкость бетона, поликарбоксилаты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Талипов Л.Н., Величко Е.Г., Семенов В.С. Исследование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 824–833. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.824-833

Study of synergetic effect of the complex polycarboxylate anti-corrosion additive in the model of pore concrete fluid

Linar N. Talipov, Evgeny G. Velichko, Vyacheslav S. Semenov

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

ABSTRACT

Introduction. Corrosion of reinforcement in concrete structures is rather expensive for the economy of any country. Current statutory documents offer two main directions — primary and secondary protection. One of the promising areas of primary protection methods is the use of complex anti-corrosion additives in concrete due to its technological simplicity and economic efficiency. Passivators and surfactants (SAS), as components of such additives, are of particular interest. Sodium nitrite is offered as a passivator, and polycarboxylate molecules (PCE) — as a SAS. The additive of sodium nitrite together with PCE has a visual synergistic effect.

Materials and methods. Identification of structural characteristics of the molecules of the obtained PCE polymers was determined by methods of exclusion gel-permeation chromatography and ^{13}C NMR spectroscopy. To study the synergetic effect of $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ additive, the samples were kept in the models of pore liquid, after which the morphology of their surface was studied by methods of scanning electron microscopy and electron probe microanalysis.

Results. The texture and surface color of the presented micrographs indicate surface formations on the samples stored in the models of pore liquid with different anti-corrosion additives. Electron probe microanalysis showed increased concentrations of carbon, oxygen and sodium on the surface of samples stored in pore concrete liquid models with the addition

of a complex anti-corrosion additive of sodium nitrite and PCE, which indicates increased concentrations of PCE and possible increased pH on the steel surface. Based on the data acquired, the mechanism of formation of a protective film layer using complex anti-corrosion additive $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ is offered.

Conclusions. Justification of synergetic effect of complex polycarboxylate anti-corrosion additive in the model of concrete pore liquid opens up prospects for research of such additives to the concrete model.

KEYWORDS: complex anti-corrosion additive, protection of reinforcement, sodium nitrite, concrete pore liquid, polycarboxylates

FOR CITATION: Talipov L.N., Velichko E.G., Semenov V.S. Study of synergetic effect of the complex polycarboxylate anti-corrosion additive in the model of pore concrete fluid. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):824-833. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.824-833 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Исследование и разработка эффективных систем и методов борьбы с коррозией металлов и сплавов актуальны и по сей день. Основная причина — экономические потери от коррозии во всех отраслях промышленности. Порядок экономических затрат исчисляется триллионами долларов и эквивалентен 3,4 % ВВП за 2013 г. [1]. Разумеется, немалая часть из этого отводится мировому строительному сектору. В частности, в Северной Америке расходы на ремонт мостов и путепроводов по причине хлоридной коррозии арматуры в бетоне в 2008 г. превысили 300 млрд долларов в год, а в Канаде в 2003 г. оценивались на уровне 125 млрд долларов [2]. В Российской Федерации ущерб составляет порядка 20–25 млрд рублей ежегодно [3].

В СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» сообщается о первичной и вторичной защитах. В качестве вторичной защиты от коррозии стальной арматуры в бетоне главным образом применяются лакокрасочные материалы, оклеечные, обмазочные и пенетрирующие системы гидроизоляции, для первичной защиты используется в основном разработка составов цементных систем, обеспечивающих пассивацию стальной арматуры и снижающих диффузионную проницаемость цементного камня. Очевидно, что применение комплексных антикоррозионных добавок с целью первичной защиты для слабоагрессивных сред может быть наименее затратным и наиболее простым в экономическом и технологическом аспектах соответственно. При этом за счет повышения эффективности комплексных антикоррозионных добавок возможно получить снижение затрат вторичной защиты для среднеагрессивных сред, а при сильноагрессивных — повысить долговечность железобетона.

Комплексные антикоррозионные добавки, способные уплотнять структуру цементного камня и пассивировать сталь в бетоне, представляют наибольший интерес из-за их полифункционального действия, которое, в свою очередь, приводит к экономическому интересу. К таким добавкам относят комплексные модификаторы структуры и свойств бетона, представляющие собой совокупность пассиватора и поверхностно-активного вещества (ПАВ).

Первые отечественные исследования влияния комплексной антикоррозионной добавки на основе нитрит-нитрата кальция и нафталинформальдегидного ПАВ были опубликованы в работе [4], в которой отмечается взаимодополняющий эффект компонентов добавки, а именно адсорбция ионов натрия с уменьшением свободной энергии и улучшение структуры цементного камня, его уплотнение за счет уменьшения водоцементного отношения (В/Ц). Несколько позднее в труде [5] рассмотрены результаты исследований добавок на основе нитрита натрия и нафталинформальдегидного ПАВ (С-3). Эта добавка не была достаточно эффективной, однако при добавлении к ней отхода производства жиров наблюдался синергизм, обусловленный в основном адсорбционно-пленочным механизмом. В исследовании [6] предложены и проверены условия, при которых добавка нитрита натрия совместно с ПАВ нафталинформальдегидного типа (С-3) оказалась результативной с точки зрения пассивации стали. Одним из главных условий проявления этого эффекта стало сохранение некоторого количества добавки в жидкой фазе. Очевидно, что содержание добавки в диффузионной зоне возможно только при образовании полимолекулярных слоев на гидратных образованиях минералов клинкера и соответственно повышенной ее концентрации, ведущей к снижению прочности цементного камня вследствие проявления эффекта Ребиндера, влияние которого усиливается при наличии в жидкой фазе ПАВ [7]. В работах [7, 8] также отмечается, что повышенная концентрация С-3 снижает прочностные характеристики бетона. В публикации [9] рассмотрен синергетический эффект при исследовании добавки нитрита натрия совместно с суперпластификаторами на основе эфиров поликарбоксилатов (РСЕ), что является первой прямой предпосылкой для применения полимеров с карбоксильными группами в составе комплексной антикоррозионной добавки — модификатора структуры и свойств бетона.

Молекулы РСЕ, как правило, состоят из гребнеобразной структуры сополимера, основная анионная цепь которого — полиметакрилат — удерживает адсорбирующие карбоксильные группы и боковые эфирные неадсорбирующие цепи, главным образом полиэтиленоксид (РЕО) или полиэти-

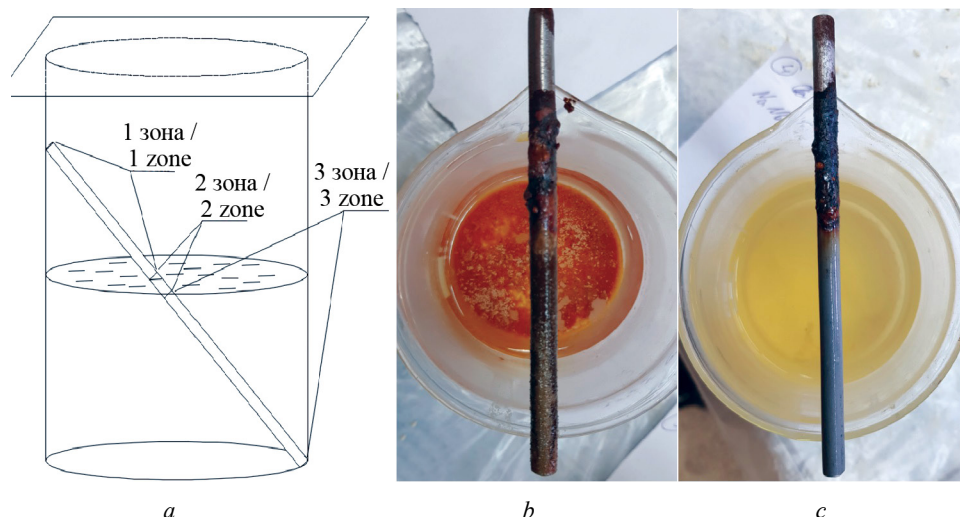


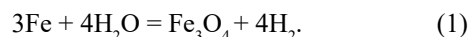
Рис. 1. Фотографии стержней через 40 дней выдержки в модели поровой жидкости бетона с антикоррозионными добавками
Fig. 1. Pictures of rods after 40 days of exposure in a model of pore concrete liquid with anti-corrosion additives

ленгликоль (PEG) [10]. Особенностью PCE является то, что остов гребня может быть сконструирован и модифицирован в соответствии с различными требованиями к бетону и бетонной смеси. Изменяя архитектуру молекулы, возможно получить различные варианты (наборы) молекул по адсорбирующим характеристикам, а применяя разные наборы в рамках одной комплексной антикоррозионной добавки совместно с нитритом натрия, — получить конкурентную адсорбцию с сохранением ПАВ в жидкой фазе.

Визуально синергетический эффект был установлен при исследовании антикоррозионных добавок на основе эфиров PCE (рис. 1). Стержни выдерживались в модели поровой жидкости pH = 12, загрязненной хлоридом кальция концентрацией 3,5 % в течение 40 суток. На рис. 1, b в модели присутствовала антикоррозионная добавка 1%-го NaNO₂, на рис. 1, c в составе модели находилась комплексная антикоррозионная добавка 1 % NaNO₂ + 0,5 % PCE. Очевидно, что комплексная антикоррозионная добавка в модели поровой жидкости бетона оказывала пассивирующее по отношению к стали дей-

ствие. Объяснение полученного эффекта в синергетическом или аддитивном вариантах требовало проведения дальнейших исследований.

Как известно, коррозия арматуры в бетоне происходит по электрохимическому механизму, разность потенциалов наблюдается между разными структурными составляющими сплава [11]. Когда сталь попадает в среду с высокими pH (12 и более), такими как у свежеприготовленной бетонной смеси на клинкерном вяжущем, происходит образование на ее поверхности Fe₃O₄ — магнетита (рис. 2):



Fe₃O₄ — ферромагнетик, которому свойственны отсутствие атомного порядка и, как следствие, менее прочная структура, служит хорошим электрическим проводником, поэтому, пока pH сохраняется высоким и отсутствуют агрессивные деполяризаторы, толщина и структура пленки позволяют сохранять сталь в пассивном состоянии. Как только pH бетона снижается до 11 и ниже, возникает высокая вероятность депассивации. Согласно труду [11], принято считать, что при снижении pH до 11...9

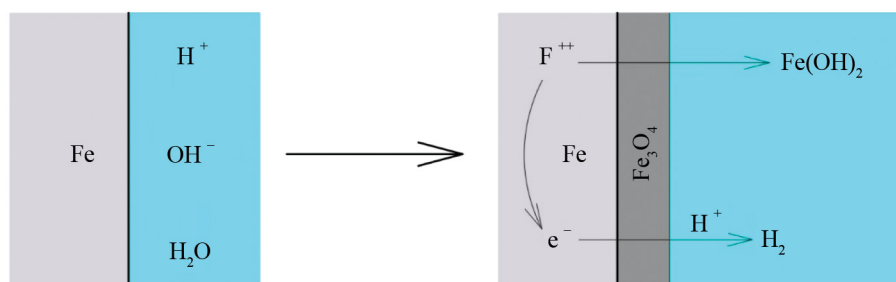


Рис. 2. Геометрическая схема формирования защитного слоя в поровой жидкости бетона
Fig. 2. Geometric layout of protective layer formation in concrete pore liquid

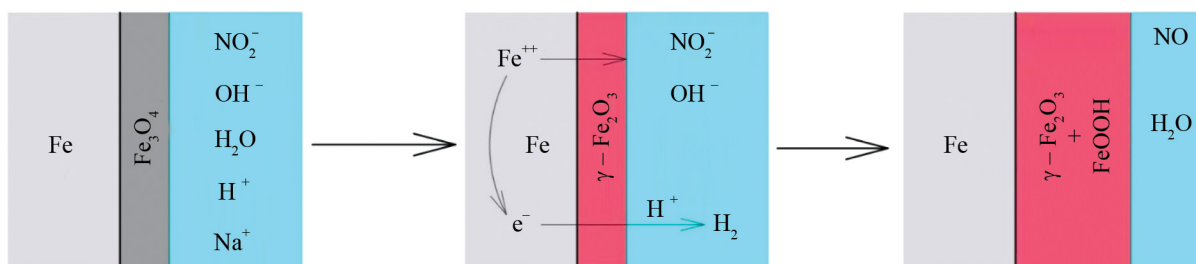


Рис. 3. Геометрия реакции образования магнетита с последующим его окислением до $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с возможным образованием FeOOH в поровой жидкости бетона с антикоррозионной добавкой NaNO_2

Fig. 3. Magnetite formation reaction geometry with its subsequent oxidation to $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ with possible formation of FeOOH in concrete pore liquid with anti-corrosion additive NaNO_2

коррозия происходит по механизму кислородной деполяризации, однако [12] наблюдается восстановление водорода при $\text{pH} = 11$. За счет малой толщины слоя Fe_3O_4 8–15 Å [13] и характера электрической проводимости электроны начинают мигрировать из стали и оксидной пленки, восстанавливая водород и/или кислород, а катионы железа — переходить в раствор.

Когда в составе бетонной смеси есть антикоррозионная добавка нитрит натрия, пленка состоит из Fe_3O_4 и Fe_2O_3 с преимущественными фазами $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ либо только из фаз $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [14, 15]. Трехвалентный оксид железа ближе к диэлектрикам, так как в 106 раз меньше по электропроводности, чем оксид железа (II). Объясняется это тем, что в состоянии трехвалентности железо труднее отдает электроны и это, в свою очередь, затрудняет миграцию электронов. Анионы нитрита натрия адсорбируются на поверхности Fe_3O_4 , окисляя Fe^{++} до Fe^{+++} . Первая сформированная элементарная ячейка Fe_3O_4 окисляется до $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ по формуле (2), и дальнейшая диффузия Fe^{++} происходит через эту пленку $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с возможным образованием FeOOH [16, 17]:



Ион двухвалентного железа, который достигает границы раздела оксидного раствора, окисляется до иона трехвалентного железа адсорбированным окислителем, что приводит к дальнейшему утолщению пленки. Основная сила, ответственная за диффузию Fe^{++} через $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, обеспечивается электростатическим притяжением между адсорбированным отрицательным анионом и ионами положительного металла в решетке, пленка в этом случае достигает толщины 50–75 Å [13]. Геометрия реакции показана на рис. 3.

Несмотря на более прочную структуру, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ все же не обеспечивает полную изоляцию, и при концентрированной локализации деполяризаторов пленка может разрушаться. Такими деполяризаторами могут быть ионы хлора, их сильная электроотрицательность создает сильное электростатическое поле, оттягивая атомы железа сначала

с оксидной пленки, затем из металла, что и произошло с образцом на рис. 1, b.

Основываясь на результатах более ранних исследований прошлых лет, принималось, что действие комплексной антикоррозионной добавки на поверхность стали происходит по адсорбционно-пленочному механизму. Следовательно, при наличии полимеров в среде сталь должна их адсорбировать на своей поверхности. О возможности адсорбции ПАВ на стали свидетельствуют результаты емкостно-омических измерений и электронографических исследований [18]. Адсорбция на металле была доказана прямыми исследованиями с использованием сталагмометра [5]. Более гладкая поверхность визуализировалась методами электронной сканирующей микроскопии у образцов, обработанных ПАВ [19]. В работах [20, 21] сообщается, что протонодонорные карбоксильные группы COO адсорбируются на поверхности стали, однако их адсорбирующая характеристика зависит от электронодонорных групп — радикалов.

Установлено, что из органических ингибиторов, имеющих в своей структуре анионактивные группы, проявляют более эффективное ингибирование вещества с наиболее высоким молекулярным размером и высокой электронной плотностью на адсорбционных центрах [22]. Поэтому молекулы РСЕ имеют больший потенциал в качестве компонента антикоррозионной добавки, так как по своим размерам могут достигать порядка 1 млн Да и более [23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

От завода-производителя полимерных суперпластификаторов Sika было получено три чистых некоммерческих суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов с преимущественным содержанием одной фракции молекул, производящихся в России. Идентификация полученного материала происходила по параметрам — численная молекулярная масса M_n и средневесовая молекулярная масса M_w , определявшимся методом эксклюзионной (гель-проникающей) хромато-

Табл. 1. Структурные характеристики молекул

Table 1. Structural characteristics of molecules

Наименование / Name	C/E	M_n , Да / M_n , Yes	M_w , Да / M_w , Yes	PDI	Сохраняемость, мин / Preservation capacity, min
PCE 1	2,1	8225	11 376	1,38	до 90
PCE 2	3,3	15 958	> 46 616	> 2,92	до 70
PCE 3	2,5	> 22 570	> 280 156	–	20–40

графии при 30 °С с использованием хроматографической системы Waters, оснащенной каскадом колонок (Ultrahydrogel 120 и Ultrahydrogel 250) и рефрактометрическим детектором. В качестве элюента использовали 0,1 М водного раствора нитрата натрия, скорость потока 1,0 мл/мин. Все образцы были растворены в элюенте и отфильтрованы через мембранный фильтр PVDF. Калибровка колонок выполнена по стандартным образцам полиэтиленгликоля (диапазон молекулярных масс 20 600–960 Да). Отношение карбоксилата к сложному эфиру (C/E) исследовалось методом ЯМР-спектроскопии на ядрах ^{13}C . Исследования проведены на спектрометре Bruker Avance III NanoBay 300 МГц с использованием стандартных методик Bruker, в режиме термостатирования при 25 °С. Образцы растворены в дейтерированной воде в соотношении 1:1. Значение определялось по интегральным интенсивностям в спектре ^{13}C . За сигналы сложноэфирных групп приняты пики в области 175–179 ppm, за сигналы карбоксилата — пики в области 180–183 ppm. Результаты исследования структурных характеристик молекул отражены в табл. 1.

Моделировалась поровая жидкость бетона по параметру pH = 12 добавлением в водопроводную воду гидроксида натрия. Масса модели поровой жидкости составила 300 г. Масса гидроксида натрия вычислена по формулам (3)–(5):

$$\text{pOH} = 14 - 12 = 2; \quad (3)$$

$$[\text{OH}^-] = 10 - \text{pOH} = 10^{-2} \text{ моль/л}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH}) &= \text{CVM} = \\ &= 10 - 2 \cdot 0,3 \cdot 40 = 0,12 \text{ г}. \end{aligned} \quad (5)$$

Два экземпляра модели поровой жидкости изготавливались и укладывались в стеклянную тару (рис. 2). В состав экземпляра поровой жидкости № 2 вводили антикоррозионную добавку 1 % нитрата натрия высшего сорта по ГОСТ 19906 «Нитрит натрия технический. Технические условия», в составе № 3 применяли комплексную антикоррозионную добавку — 1 % нитрита натрия совместно с 0,51 % PCE (табл. 2), в состав № 4 вводили только 0,51 % PCE.

Табл. 2. Составы моделей поровой жидкости

Table 2. Compositions of pore liquid models

№	NaOH, г	NaNO ₂ , %	PCE ₁ , %	PCE ₂ , %	PCE ₃ , %
1	–	–	–	–	–
2	0,12	1,0	–	–	–
3	0,12	1,0	0,17	0,17	0,17
4	0,12	–	0,17	0,17	0,17

В указанных в табл. 2 моделях поровой жидкости образцы размерами 1,5 × 1,5 × 4 мм из стали марки СтЗсп, шлифованные до металлического блеска 7-го класса чистоты, выдерживались 10 суток (рис. 4), один образец сравнения (контрольный) в жидкости не выдерживался.



Рис. 4. Фотографии образцов при выдерживании в модели поровой жидкости бетона

Fig. 4. Photos of samples stored in the model of pore concrete liquid

Через десять суток морфологию поверхности полимерных покрытий исследуемых образцов изучали методом электронной сканирующей микроскопии «JSM-U3» фирмы Jeol (Япония) во вторичных электронах, ускоряющим напряжением 15 кВ. Энергетическим рентгеноспектральным микроанализом «Eutex» (Германия) исследовали элементный анализ поверхности образцов с целью идентификации защитного покрытия по химическим элементам, входящим в его состав, и определения его сплошности. Набор рентгеновских спектров осуществляли с площади поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На микрофотографиях (рис. 5) видны отличия цвета и текстуры поверхностей выдержанных образ-

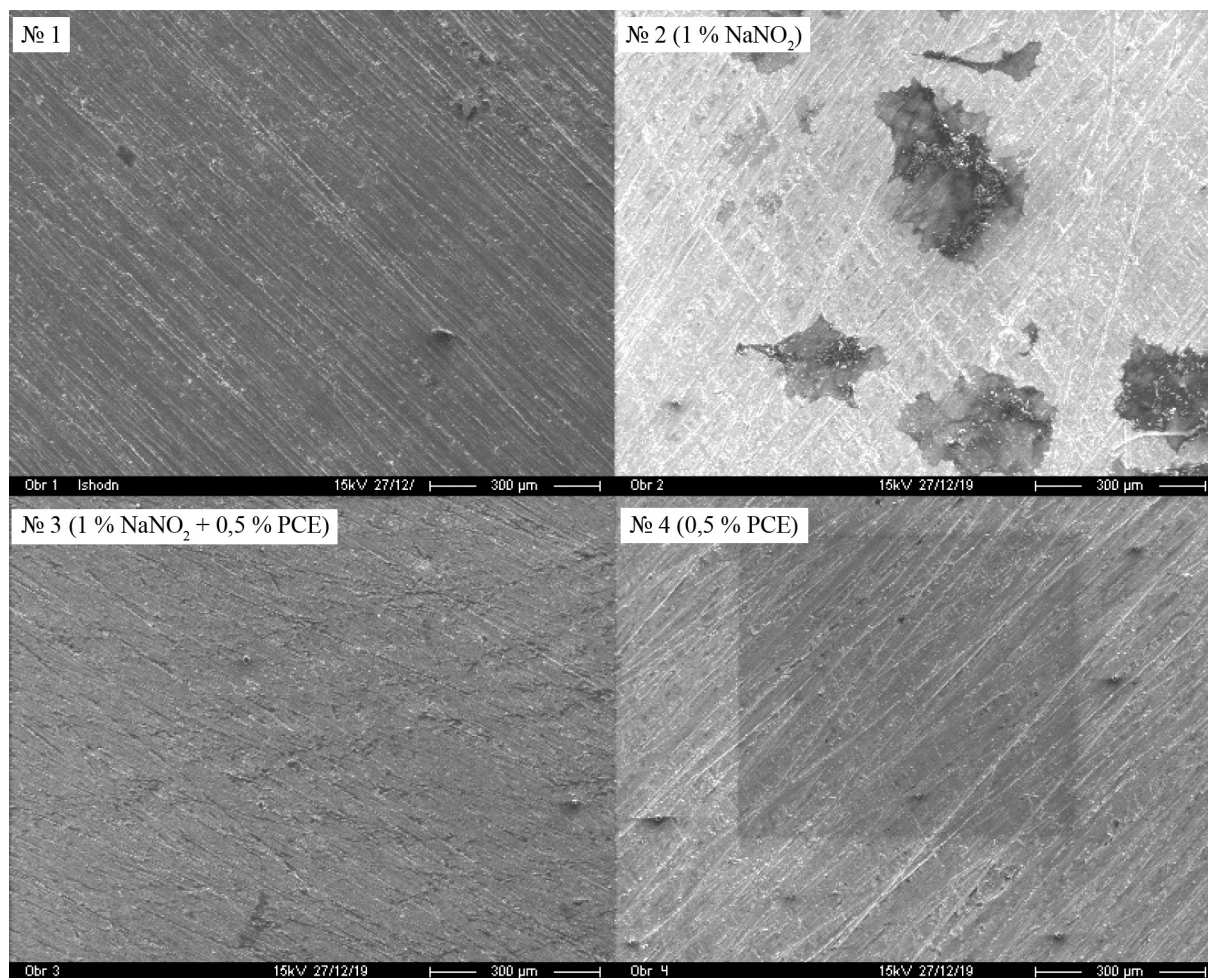


Рис. 5. Микрофотографии фрагмента поверхности образцов

Fig. 5. Micrographs of a surface sample fragment

цов относительно образца сравнения, что свидетельствует об образовании тонких пленочных слоев у образцов, находившихся в моделях поровой жидкости бетона, содержащих антикоррозионные добавки.

Наборы спектров, регистрировавшихся по площади поверхности, были постоянными, что свидетельствует об однородности образовавшегося покрытия на поверхности всех образцов, которые выдерживались в моделях поровой жидкости. На рис. 6 отражены зарегистрированные наборы спектров, полученные в ходе рентгеноспектрального микроанализа.

У образца, выдержанного в модели поровой жидкости бетона с комплексной антикоррозионной добавкой 1 % NaNO_2 + 0,5 % PCE, наблюдалась относительно повышенная интенсивность кислорода, углерода и натрия на поверхности. Повышенная интенсивность при рентгеноспектральном микроанализе свидетельствует о повышенном содержании элемента в исследуемом объеме [24, 25].

В случае, если антикоррозионная добавка комплексная и помимо нитрита натрия содержит молекулы с карбоксильными группами PCE, то образо-

вание защитного слоя происходит таким образом, что по мере роста пленки из $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ карбоксильная группа COONa у поверхности оксидов металла диссоциирует на COO^- и Na^+ и далее адсорбируется на нее слой за слоем, встраиваясь между кристаллической решеткой оксида железа (III). Чем дальше от поверхности металла и ближе к границе раздела фаз оксидная пленка-раствор, тем плотнее упаковка полимера в окислах железа, так как замедление роста пленки характеризует прекращение конкурентной адсорбции COO^- и NO_2^- . В завершении формирования слоя, на поверхности образуется монослой полимера, представляющий собой потенциальный физико-химический барьер, в котором концентрируются диссоциированные ионы натрия и распределяются в соответствии с молекулярным отбором ближе к поверхности стали, создавая градиентное значение pH с его увеличением от раствора к поверхности металла [26]. Геометрическая схема формирования защитной пленки представлена на рис. 7.

Как правило, при применении индивидуально адсорбирующих органических ингибиторов прерывается катодный процесс. Поэтому наличие орга-

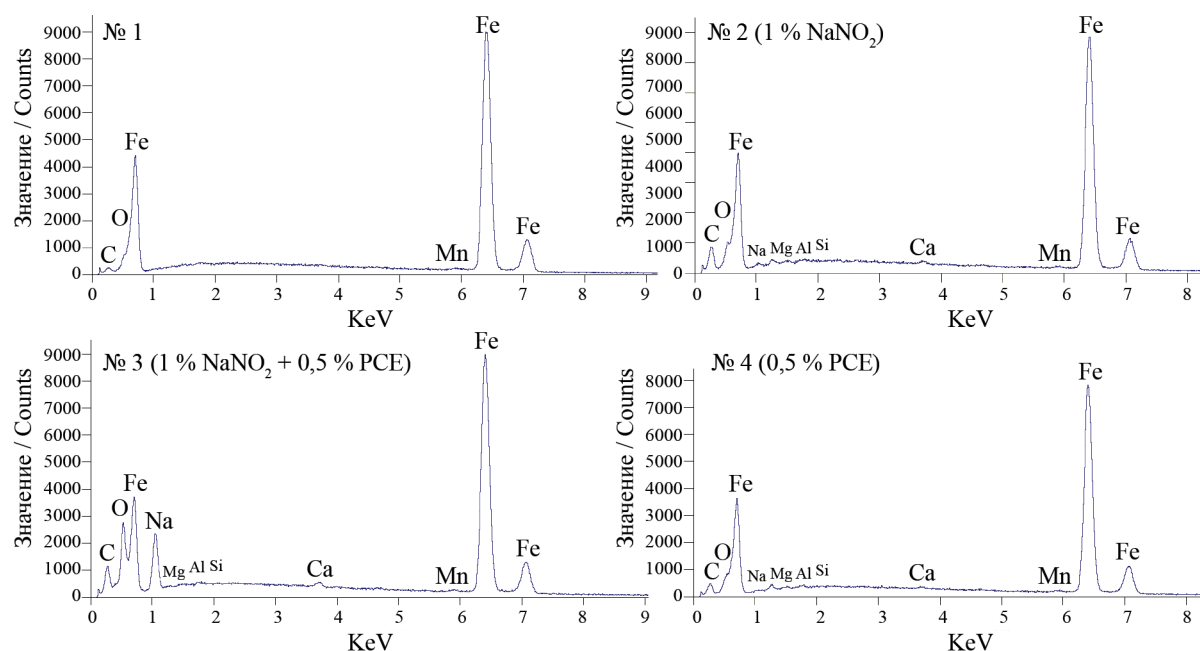
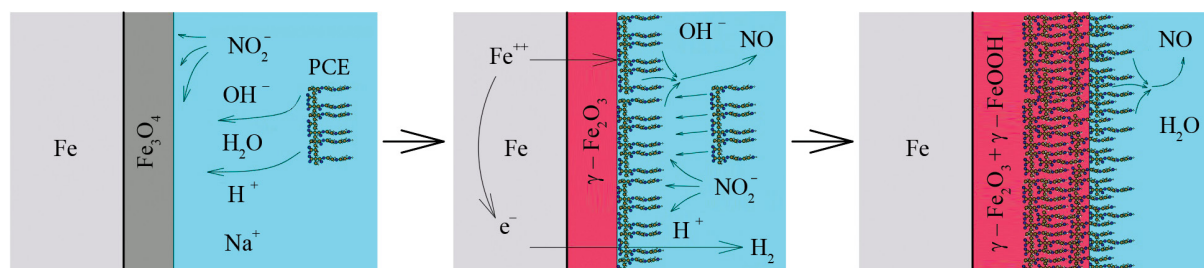


Рис. 6. Зарегистрированные наборы спектров поверхности исследованных образцов

Fig. 6. Registered sets of surface spectra of tested samples

Рис. 7. Геометрическая схема формирования защитного слоя в поровой жидкости бетона с комплексной антикоррозионной добавкой $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ Fig. 7. Geometric layout of a protective layer formation in concrete pore liquid with complex anti-corrosion additive $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$

нических полимеров в структуре оксидной пленки, образовавшейся под действием нитрит ионов, повышает диэлектрические свойства защитного контента на железе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Очевидно, что образованная пленка от влияния комплексной добавки $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ обладает большей плотностью и лучшими изолирующими свойствами. А синергетический эффект обусловлен наличием в структуре окислов упаковки молекул поликарбоксилатов, о чем свидетельствует относительное повышение содержания кислорода, углерода и натрия, выявленное при рентгено-спектральном анализе у образцов, выдержанных в модели поровой жидкости бетона, содержащих комплексную антикоррозионную добавку $\text{NaNO}_2 + \text{PCE}$ (рис. 4).

Полученный синергетический эффект расширяет перспективы разработки комплексной антикоррозионной добавки на основе эфиров поликарбоксилатов. Необходимо учитывать, что бетонная смесь на клинкерном вяжущем содержит высокодисперсные частицы, которые будут активно поглощать PCE из жидкой фазы. Так как PCE применяются как модификаторы ряда свойств бетона и бетонной смеси, в будущем возможна разработка полифункционального антикоррозионного модификатора бетона, который вместе с ингибирующими стальную арматуру свойствами будет иметь направленные свойства, модифицирующие технологические характеристики бетонных смесей и бетонов.

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности разработки комплексной антикоррозионной добавки на основе эфиров поликарбоксилатов и проведении исследований в модели бетона по ГОСТ 31383 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний».

ЛИТЕРАТУРА

1. Koch G., Varney J., Thompson N., Moghissi O., Gould M., Payer J. International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE International Impact. 2016. P. iii. URL: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
2. Campbell F.C. Elements of metallurgy and engineering alloys. Materials Park, Ohio : ASM International, 2008. 670 p. DOI: 10.31399/asm.tb.emea.9781627082518
3. Никитин С.Е., Белов В.В. Прогнозирование срока службы железобетонных конструкций транспортных сооружений // Интернет-журнал «Наукоедение». 2014. № 5 (24). 20 с. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05KO514.pdf>
4. Алексеев С.Н., Ратинов В.Б., Розенталь Н.К., Каширников Н.М. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях. М. : Стройиздат, 1985. 272 с.
5. Туникин Е.И., Платонова Е.Е. Повышение способности металлов к пассивации применением комплексных добавок. М. : АСВ, 2009. 128 с.
6. Velichko E.G., Talipov L.N. Theoretical and practical aspects of improving the durability of steel reinforcement in transport designs, using passivation and plasticizing chemical additives // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 012202. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012202
7. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М. : Наука, 1979. 142 с.
8. Баженков Ю.М., Демьянова В.С., Калашиников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : АСВ, 2006. 368 с.
9. Talipov L., Velichko E. Effect of polycarboxylate and polyarylate surfactants on corrosion of the steel reinforcement embedded in the concrete // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 01026. DOI: 10.1051/mateconf/201825101026
10. Gay C., Raphael E. Comb-like polymers inside nanoscale pores // Advances in Colloid and Interface Science. 2001. Vol. 94. Issue 1–3. Pp. 229–236. DOI: 10.1016/S0001-8686(01)00062-8
11. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. 2-е изд. М. : Стройиздат, 1968. 231 с.
12. Fujimoto N., Sawada T., Tada E., Nishikata A. Effect of pH on hydrogen absorption into steel in neutral and alkaline solutions // Materials Transactions. 2017. Vol. 58. Issue 2. Pp. 211–217. DOI: 10.2320/matertrans.M2016360
13. Cohen M. The formation and properties of passive films on iron // Canadian Journal of Chemistry. 1959. Vol. 37. Issue 1. Pp. 286–291. DOI: 10.1139/v59-037
14. Cohen M. The breakdown and repair of inhibitive films in neutral solution // Corrosion. 1976. Vol. 32. Issue 12. Pp. 461–465. DOI: 10.5006/0010-9312-32.12.461
15. Marshall A. Corrosion inhibitors for use in neutral water system // Conference proceedings: North Sea condensate reservoirs and their development. London : Oyez Scientific and services Ltd, 1983. 109 p.
16. Söylev T.A., Richardson M.G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22. Issue 4. Pp. 609–622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013
17. Page C. Aspect of the performance of corrosion inhibitors applied to reinforced concrete // 9th European symposium on corrosion Inhibitors. Ferrara : University of Ferrara, 2000.
18. Туникин Е.И. и др. О составе защитных пленок, образующихся на поверхности стальной арматуры в бетонах, содержащих смесь нитрита натрия и ПАВ // Исследование по строительству. Таллин : Валгус, 1984. С. 3.
19. Maqsood A.M., Mohd A.H., Firdosa N., Shaeel A.A., Zaheer K. Anti-corrosion ability of surfactants: a review // International Journal of Electrochemical Science. 2011. Vol. 6. Issue 6. Pp. 1927–1948.
20. Cabrini M., Fontana F., Lorenzi S., Pastore T., Pellegrini S. Effect of organic inhibitors on chloride corrosion of steel rebars in alkaline pore solution // Journal of Chemistry. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2015/521507
21. Ormellese M., Lazzari L., Goidanich S., Fumagalli G., Brenna A. A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete // Corrosion Science. 2009. Vol. 51. Issue 12. Pp. 2959–2968. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.08.018
22. Elewady G.Y., El-Said I.A., Fouda A.S. Anion Surfactants as Corrosion Inhibitors for Aluminum Dissolution in HCl Solutions // International Journal of Electrochemical Science. 2008. Vol. 3. Issue 2. Pp. 177–190.
23. Platel D., Suau J., Chosson C., Matter Y. New Additive to Enhance the Slump Retention // Proc. 11 Int. Conf. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. 2015. Vol. 302 (4). Pp. 53–62. URL: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51688084>
24. Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л., Гранина Л.З. Определение содержания и валентного состояния железа и марганца в железомарганцевых конкрециях по эмиссионным линиям К-серии рент-

геновского флуоресцентного спектра // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 2. С. 65–72.

25. Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л., Суво-рова Л.Ф., Костровицкий С.И. Определение валентного состояния железа в пикроильмените методами рентгеновского электронно-зондового микроанализа

и рентгенофлуоресцентного анализа // Записки Российского минералогического общества. 2012. Т. 141. № 2. С. 83–91.

26. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2012. 309 с.

Поступила в редакцию 21 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Линар Накифович Талипов** — аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 929071, ORCID: 0000-0001-5964-0983, Scopus: 57197805512; nakifulu@mail.ru;

Евгений Георгиевич Величко — доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287053, ORCID: 0000-0002-6742-8621, Scopus: 57192378759; pct44@yandex.ru;

Вячеслав Сергеевич Семенов — кандидат технических наук, доцент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 628141, Scopus: 55982302500; science-isa@yandex.ru.

REFERENCES

1. Koch G., Varney J., Thompson N., Moghissi O., Gould M., Payer J. *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. NACE International Impact. 2016; iii. URL: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
2. Campbell F.C. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2008; 670. DOI: 10.31399/asm.tb.emea.9781627082518
3. Nikitin S.E., Belov V.V. Reinforced Concrete Construction Durability Estimation of Transport Constructions. *Science Studies: an Internet Journal*. 2014; 5(24):20. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05KO514.pdf> (rus.).
4. Alekseev S.N., Ratinov V.B., Rozental' N.K., Kashurnikov N.M. *Steel corrosion inhibitors in reinforced concrete structures*. Moscow, Stroyizdat, 1985; 272. (rus.).
5. Tupikin E.I., Platonova E.E. *Increasing the ability of metals to passivate using complex additives*. Moscow, ASV, 2009; 128. (rus.).
6. Velichko E.G., Talipov L.N. Theoretical and practical aspects of improving the durability of steel reinforcement in transport designs, using passivation and plasticizing chemical additives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90:012202. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012202
7. Rebinder P.A. *Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical Mechanics*. Moscow, Nauka, 1979; 142. (rus.).
8. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modified high quality concrete*. Moscow, ASV, 2006; 368. (rus.).
9. Talipov L., Velichko E. Effect of polycarboxylate and polyarylate surfactants on corrosion of the steel reinforcement embedded in the concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:01026. DOI: 10.1051/matec-conf/201825101026
10. Gay C., Raphael E. Comb-like polymers inside nanoscale pores. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001; 94(1-3):229-236. DOI: 10.1016/S0001-8686(01)00062-8
11. Alekseev S.N. *Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1968; 231. (rus.).
12. Fujimoto N., Sawada T., Tada E., Nishikata A. Effect of pH on hydrogen absorption into steel in neutral and alkaline solutions. *Materials Transactions*. 2017; 58(2):211-217. DOI: 10.2320/matertrans.M2016360
13. Cohen M. The formation and properties of passive films on iron. *Canadian Journal of Chemistry*. 1959; 37(1):286-291. DOI: 10.1139/v59-037
14. Cohen M. The breakdown and repair of inhibitive films in neutral solution. *Corrosion*. 1976; 32(12):461-465. DOI: 10.5006/0010-9312-32.12.461
15. Marshall A. Corrosion inhibitors for use in neutral water system. *Conference proceedings: North*

Sea condensate reservoirs and their development. London, Oyez Scientific and services Ltd, 1983; 109.

16. Söylev T.A., Richardson M.G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(4):609-622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013

17. Page C.L., Ngala. V.T., Page M.M. Corrosion Inhibitors in concrete repair system. *Magazine of concrete research*. 2000; 52(1):25-37. DOI: 10.1680/mac.2000.52.1.25

18. Tupikin E.I. On the composition of protective films formed on the surface of steel reinforcement in concrete containing a mixture of sodium nitrite and surfactant. *Construction Study*. Tallinn, Valgus publ., 1984; 93. (rus.).

19. Maqsood A.M., Mohd A.H., Firdosa N., Shaeel A.A., Zaheer K. Anti-corrosion ability of surfactants: a review. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011; 6(6):1927-1948.

20. Cabrini M., Fontana F., Lorenzi S., Pastore T., Pellegrini S. Effect of organic inhibitors on chloride corrosion of steel rebars in alkaline pore solution. *Journal of Chemistry*. 2015; 2015:1-10. DOI: 10.1155/2015/521507

21. Ormellesse M., Lazzari L., Goidanich S., Fumagalli G., Brenna A. A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete.

Corrosion Science. 2009; 51(12):2959-2968. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.08.018

22. Elewady G.Y., El-Said I.A., Fouda A.S. Anion Surfactants as Corrosion Inhibitors for Aluminum Dissolution in HCl Solutions. *International Journal of Electrochemical Science*. 2008; 3(2):177-190.

23. Platel D., Suau J., Chosson C., Matter Y. New additive to enhance the slump retention. *Proc. 11 Int. Conf. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. 2015; 302(4):53-62. URL: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51688084>

24. Chubarov V.M., Finkel'shteyn A.L., Graniina L.Z. Determination of content and valence state of iron and manganese in nodules using K-series emission lines of X-RAY fluorescence spectrum. *Analytics and Control*. 2010; 14(2):65-71. (rus.).

25. Chubarov V.M., Finkel'shteyn A.L., Suvorova L.F., Kostrovitskiy S.I. Of the iron valence state in microilmenites with use of X-RAY electron microprobe and X-RAY-fluorescence analyses. *Proceedings of the Russian mineralogical society*. 2012; 141(12):83-91. (rus.).

26. Melihov I.V. *Physicochemical Evolution of Solid*. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2012; 309 (rus.).

Received February 21, 2020.

Adopted in a revised form on May 5, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

BIONOTES: **Linar N. Talipov** — postgraduate student of the Department of Building Materials and Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 929071, ORCID: 0000-0001-5964-0983, Scopus: 57197805512; nakifulu@mail.ru;

Evgeny G. Velichko — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 287053, ORCID: 0000-0002-6742-8621, Scopus: 57192378759; pct44@yandex.ru;

Vyacheslav S. Semenov — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 628141, Scopus: 55982302500; science-isa@yandex.ru.

Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати

Е.В. Королев, Тхань Куй Зыонг, А.С. Иноземцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Совершенствование технологии 3D-печати с использованием бетонных смесей на основе портландцемента во многом зависит от рационального решения задачи обеспечения нормального твердения экструдированных слоев бетона. Нарушение режима твердения имеет известные негативные последствия и сопряжено со значительными экономическими потерями. Предложено использовать полиакрилатные растворы, приготовление которых перед применением в бетонной смеси позволяет управлять процессом их полимеризации, отложив сорбционную функцию добавки во времени для обеспечения требуемой реологии.

Материалы и методы. Исследовано влияние раствора суперабсорбирующего полимера (САП) на процессы структурообразования и свойства цементных материалов. Оценка степени гидратации осуществляли по калориметрическому методу по суммарной тепловой энергии с помощью изотермического калориметра TAM AIR. Идентификация основных фаз цементного камня (ЦК) методом рентгенофазового анализа проводилась на дифрактометре XRD-6000.

Результаты. Определили, что использование растворов САП оказывает положительное влияние на подвижность цементных смесей за счет отложенной полимеризации и соответствующей абсорбции воды полимером. Величина предела прочности при изгибе варьируется в диапазоне 6,6–8,7 МПа, а предел прочности при сжатии — 68,5–71,7 МПа. Пористость характеризуется экстремальной зависимостью с минимумом при концентрации САП 1,0 % от массы портландцемента. Такие изменения свойств ЦК закономерно связаны с изменениями параметров его структурообразования. Установлено, что диапазон концентраций САП менее 1,5 % обеспечивает близкую к контрольному составу (без САП) суммарную тепловую энергию гидратации портландцемента в возрасте 86 часов.

Выводы. Установили зависимости реологических и механических свойств цементных материалов от концентрации САП. Доказали, что использование растворов САП — эффективное технологическое решение для обеспечения твердения бетона в неблагоприятных условиях. Дальнейшая разработка темы может быть направлена на исследование влияния растворов САП на свойства бетонных смесей различного состава для 3D-печати.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутренний уход, твердение в неблагоприятных условиях, суперабсорбирующий полимер, полиакрилатный гидрогель, гидратация портландцемента, структурообразование, прочность, 3D-печать

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК 1394.2020.8.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев Е.В., Тхань Куй Зыонг, Иноземцев А.С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846

Method of internal care of cement hydration in 3D printing formulations

Evgenij V. Koroley, Thanh Qui Duong, Aleksandr S. Inozemtcev

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

ABSTRACT

Introduction. Improvement of 3D printing technology with the use of concrete mixtures based on Portland cement largely depends on the sustainable solution of the problem of ensuring normal hardening of extruded concrete layers. A violation of hardening has known negative consequences and entails significant economic losses. It has been suggested to use polyacrylate solutions, preparation of which before application in concrete mixture allows controlling the process of their polymerization, postponing the sorption function of the additive in time to ensure the required rheology.

Materials and methods. Influence of super absorbent polymer (SAP) solution on structural formation processes and properties of cement materials is studied. Assessment of the degree of hydration was carried out by the calorimetric method for total thermal power using the isothermal calorimeter TAM AIR. Identification of main phases of cement stone (CS) by X-ray phase analysis was performed on XRD-6000 diffractometer.

Results. It is established that the use of SAP solutions has a positive effect on the mobility of cement mixtures due to the delayed polymerization and the corresponding water absorption by the polymer. The flexural strength range is 6.6–8.7 MPa and the compression strength range is 68.5–71.7 MPa. The porosity is characterized by extreme dependence with minimum at concentration of SAP 1.0 % from weight of Portland cement. Such changes in the properties of the CS are naturally associated with changes in the parameters of its structural formation. It is established that the range of concentrations of SAP

less than 1.5 % provides close to the reference composition (without SAP) the total hydration heat power of Portland cement at the age of 86 hours.

Conclusions. The dependences of rheological and mechanical properties of cement materials on SAP concentration have been established. It has been proved that the use of SAP solutions is an effective engineering solution to ensure the hardening of concrete in adverse conditions. Further development of the topic may be aimed at studying the effect of SAP solutions on the properties of concrete mixtures of different compositions for 3D printing.

KEYWORDS: internal care, hardening under adverse conditions, super absorbent polymer, polyacrylate hydrogel, hydration of Portland cement, structural formation, strength, 3D printing

Acknowledgements: The paper was supported by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists — Candidates of Sciences MK 1394.2020.8.

FOR CITATION: Korolev E.V., Thanh Qui Duong, Inozemtcev A.S. Method of internal care of cement hydration in 3D printing formulations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):834-846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В мировом информационном пространстве наблюдается положительная динамика в количестве публикаций, посвященных технологии строительной 3D-печати [1–3]. Развитие технологии 3D-печати в строительстве обосновано рядом технико-экономических преимуществ [4, 5]. Эффективная реализация принципов послойного изготовления конструкций требует разработки материалов-«чернил» для 3D-принтеров с набором свойств, обеспечивающих как требуемую технологичность в процессе печати, так и надлежащую эксплуатационную надежность [6–8]. В сущности, технологической особенностью такой технологии изготовления бетонных конструкций можно назвать сочетание принципов безопалубочного и монолитного строительства, заключающихся, с одной стороны, в использовании рецептур с заданными вязкотекучими свойствами, а с другой — в формировании сплошных объемов смеси непосредственно на строительной площадке [9–11]. Однако устройство бетонных слоев методом экструзии на строительной площадке сопряжено с возникновением открытой площади поверхности готового изделия. Отсутствие внешнего ухода в таких условиях создает неблагоприятные предпосылки для гидратации портландцемента. Интенсивная потеря воды вследствие испарения приводит к ее недостатку для структурообразования и последующему снижению плотности бетона, усадке, трещинообразованию и потере прочности. То есть важной способностью для строительных «чернил» и бетонов, твердеющих в естественных условиях, является сохранение воды в смеси на протяжении всего периода твердения, который, очевидно, может быть сокращен за счет использования ускорителей твердения.

В работах [12–14] показано, что для обеспечения внутреннего ухода за процессами гидратации портландцемента в легких бетонах наряду с насыщением водой легкого заполнителя могут применяться суперабсорбирующие полимеры (САП). Большинство таких САП [15, 16] производится в виде гранул, порошков или волокон микроме-

трического размера, характеризующихся возможностью до 50-кратной от начального объема абсорбции воды. Сохранение влаги в объеме бетона в ранние сроки твердения обеспечивает снижение усадки от 12 до 70 % [17–19]. При этом ингибирующий усадку эффект наиболее существенно проявляется в возрасте 28 суток. Однако сорбирующее действие САП для сохранения подвижности бетонной смеси требует введения избытка воды до 20 % [17], что негативно сказывается на прочности бетона, снижение которой может достигать 10–35 % [18, 19] вследствие возникновения дополнительной пористости как от излишней воды, так и от уменьшения объема частиц САП после десорбции воды.

Из вышеизложенного следует, что применение САП в цементных смесях характеризуется положительным и отрицательным влиянием [17, 18, 20–22]. С одной стороны, использование САП, как носителя запаса воды для обеспечения гидратации вяжущего, оправдывается положительным эффектом от снижения усадки. С другой — гранулированный полимерный компонент не только требует предварительного насыщения (до 30 минут) для обеспечения достаточной подвижности смеси, что усложняет технологию производства бетона, но и выступает в структуре композита источником дополнительных пор, способствуя снижению механических свойств. При этом важнейшее значение для повышения эффективности САП имеет кинетика десорбции, когда миграция воды в достаточном количестве осуществляется из полиакрилатов в формирующийся цементный камень, а не наоборот.

Таким образом, использование САП в растворе с отложенной полимеризацией должно обеспечить цементную систему резервом воды для внутреннего ухода за процессами гидратации без потери подвижности смеси. Важное условие — установление «паритетных» концентраций полиакрилатного раствора, при которых сорбционная способность проявляется без потери степени гидратации и, как следствие, прочности бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовано влияние раствора САП на процессы структурообразования и свойства цементных составов. Вяжущим веществом является портландцемент ЦЕМ I 42,5 производства АО «Липецкцемент». В качестве САП предложено использовать многокомпонентную акрилатную композицию «Реновир гидрогель», применяемую для инъекционного осушения конструкций. Получение геля представляет собой приготовление водного раствора из трех составляющих полимерной части (ΣA): компонент A_2 — акриловая кислота (пропенная кислота $CH_2 = CH - COOH$) или ее соль (полиакрилат натрия $[-CH_2-CH(COONa)-]_n$), компонент A_2 — сшивающий агент, в качестве которого широко применяются полинасыщенные соединения; компонент A_3 — инициатор — пероксиды, гидропероксиды, перекиси водорода, персульфаты, азосоединения или окислительно-восстановительные системы; катализатор — компонент Б и вода (В).

Подвижность цементных смесей определяли по диаметру расплыва из усеченного конуса согласно ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Исследование физико-механических свойств ЦК осуществляли в возрасте 28 сут после твердения в неблагоприятных условиях (температура $27 \pm 2,5$ °C, влажность — до 60 %) в соответствии с рецептурой [23] согласно табл. 1.

Оценку степени гидратации производили с помощью калориметрического метода по суммарной тепловой энергии [25] и метода дифференциально-термического анализа (ДТА) по площади аномалии для эндотермического эффекта от разложения портландита на термограмме в диапазоне температур 470...510 °C. Калориметрический анализ цементных смесей выполнен с помощью изотермического калориметра TAM AIR (TA Instruments) в течение 72 ч. Образцы цементных смесей готовились при В/Ц = 0,5 с содержанием полимерной части 0,5–1,5 % от массы портландцемента при постоянном соотношении Б/А₁ = 0,06. ДТА проведен на высокотемпературном дифференциальном ска-

нирующем калориметре HDSC PT1600. Идентификация основных фаз ЦК методом рентгенофазового анализа осуществлялась на составах с В/Ц = 0,24 (концентрация САП 0–1,5 % от массы вяжущего) на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu). Условия проведения съемки — катод Cu, 15 кВ, 100 мкА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования составов с раствором САП представлены в табл. 2, дополнительно по экспериментальным показателям получены экспериментально-статистические модели, эмпирические коэффициенты которых приведены в табл. 3. Для аппроксимации экспериментальных данных использованы следующие функции:

- для подвижности смеси D_p , средней плотности ρ_{cp} , пределов прочности при изгибе $R_{изг}$ и сжатии $R_{сж}$:

$$Y_i = k \cdot C_{SAP} + b_0;$$

- для общей пористости (Π):

$$Y_p = a \cdot C_{CAP}^2 + k \cdot C_{SAP} + b_0,$$

где a , k и b_0 — эмпирические коэффициенты; C_{SAP} — концентрация суперабсорбирующего полимера, % от массы портландцемента.

Из экспериментальных данных, представленных в табл. 2, видно, что подвижность цементных смесей с САП с повышением количества полимера в составе незначительно увеличивается: на это указывает малое значение коэффициента k (табл. 3). Это объясняется жидким агрегатным состоянием полимерной части, которая, в отличие от гранулированных абсорбирующих добавок, не оказывает сорбирующего действия до наступления полимеризации и выступает в качестве дополнительного смазывающего компонента, что очевидно является преимуществом предлагаемого решения.

Согласно табл. 2, величина предела прочности при изгибе варьируется в диапазоне 6,6–8,7 МПа, а предела прочности при сжатии — 68,5–71,7 МПа. При этом аппроксимирование результатов экспериментальных данных показывает линейно возрастающий характер изменения предела прочности как

Табл. 1. Рецептурные характеристики исследуемых цементных смесей

Table 1. Formulation characteristics of the investigated cement mixtures

Соотношение компонентов / Ratio of components	Значение / Value						
В/Ц / W/C	0,24						
Б/А ₁ / B/A ₁	—	0,06					
В/ΣА / W/ΣА	—	95,0	47,0	23,0	18,2	15,0	11,0
САП/Ц / SAP/C, %	0,00	0,25	0,50	1,00	1,25	1,50	2,00

Примечание. Соотношение $A_2/A_1 = 0,02$ и $A_3/A_1 = 0,08$.

Note. Ratio $A_2/A_1 = 0.02$ and $A_3/A_1 = 0.08$.

Табл. 2. Реологические свойства цементных паст и физико-механические свойства ЦК с раствором САП

Table 2. Rheological properties of cement pastes and physical and mechanical properties of CS with SAP solution

№	В/ΣА / W/ΣA	ΣА/Ц, % / ΣA/C, %	D_p , мм / D_{sp} , mm	ρ_{cp} , кг/м ³ / ρ_{av} , kg/m ³	П, % / P, %	$R_{изг}$, МПа / R_f , MPa	$R_{сж}$, МПа / R_{com} , MPa
1	0	0,00	192,8±2,2	2100±10	10,1±0,4	7,2±0,3	70,4±1,4
2	95	0,25	197,8±0,5	2095±20	5,0±0,8	6,6±0,6	68,5±2,4
3	47	0,50	201,5±3,7	2095±20	5,3±0,8	6,9±0,9	70,7±2,6
4	23	1,00	197,8±1,0	2100±30	3,3±0,6	6,9±0,3	69,7±2,9
5	18	1,25	198,0±0,8	2100±10	6,2±0,5	7,0±0,8	71,7±1,7
6	15	1,50	206,5±2,4	2095±10	6,2±0,5	6,9±0,1	68,9±4,4
7	11	2,00	199,5±3,0	2100±10	8,6±0,4	8,7±0,3	70,8±2,9

Примечание. D_p — диаметр расплыва конуса; ρ_{cp} — средняя плотность; П — пористость; $R_{изг}$ — предел прочности при изгибе; $R_{сж}$ — предел прочности при сжатии.

Note. D_{sp} — flow diameter; ρ_{av} — average density; P — porosity; R_f — flexural strength; R_{com} — compressive strength.

Табл. 3. Эмпирические коэффициенты экспериментально-статистических моделей

Table 3. Empirical coefficients of experimental and statistical models

№	Свойство / Property	Эмпирический коэффициент / Empirical coefficient		
		a	k	b_0
1	Подвижность смеси / Mobility of mixture	—	3,2	196
2	Средняя плотность / Average density	—	0,6	2090
3	Пористость / Porosity	4,64	−9,0	8,7
4	Прочность при изгибе / Flexural strength	—	0,61	6,6
5	Прочность при сжатии / Compressive strength	—	0,34	69,9

при изгибе, так и при сжатии (рис. 1). Влияние используемого САП на среднюю плотность ЦК незначительно. Однако общая пористость материала имеет более выраженное изменение при варьировании содержания САП (рис. 2).

Зависимость общей пористости, как параметра структуры материала, от концентрации САП имеет экстремальный характер с минимальным значением при концентрации САП 1,0 % от массы портландцемента.

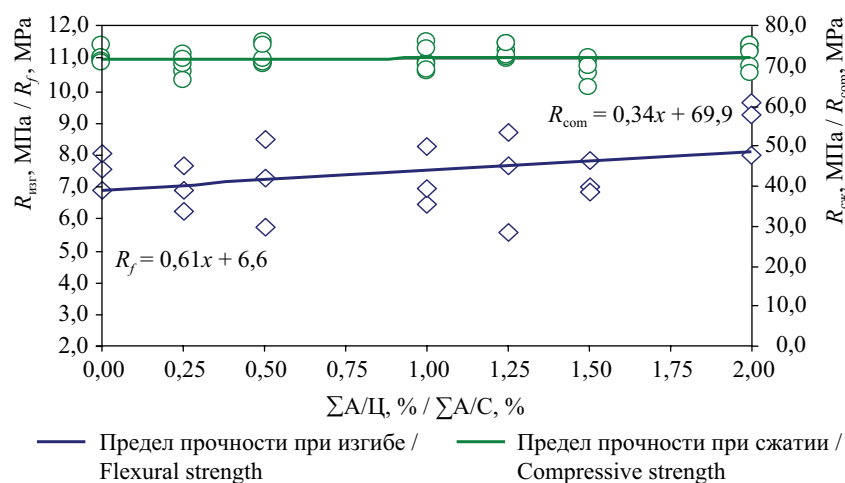


Рис. 1. Механические свойства ЦК с САП

Fig. 1. Mechanical properties of CS with SAP

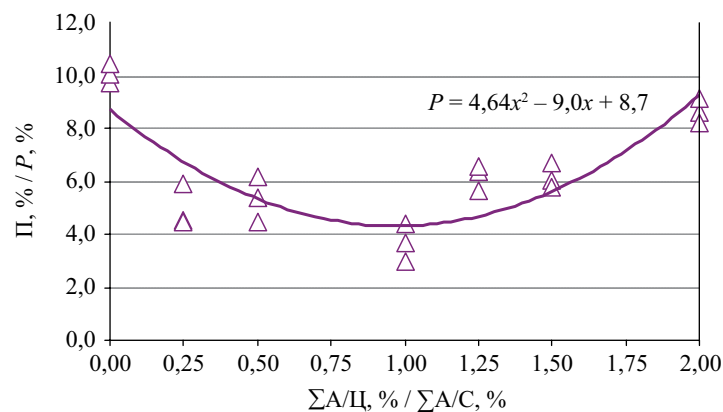


Рис. 2. Пористость ЦК с САП

Fig. 2. Porosity of CS with SAP

Особенности структурообразования ЦК в присутствии САП исследовали с применением рентгенофазового анализа (рис. 3) и калориметрии (табл. 4). На рентгенограмме ЦК можно выделить дифракционные отражения основных фаз: низко- и высокоосновные гидросиликаты кальция с межплоскостными расстояниями $d = 4,92; 3,03; 2,74; 2,61; 2,18; 1,93$ и $1,80$ Å, портландит с $d = 4,92; 2,63; 1,93$ и $1,80$ Å, тоберморит с $d = 2,76$ и $2,18$ Å, кальцит с $d = 3,03$ Å. При этом необходимо отметить, что аналогичные межплоскостные расстоя-

ния имеют и минералы цементного клинкера, что затрудняет идентификацию фаз и их количества. Введение САП отражается на рентгенограммах ЦК повышением интенсивности основных максимумов. Так, ЦК с 0,5 % САП от массы портландцемента характеризуется повышением интенсивности следующих дифракционных максимумов с $d = 3,87; 2,32; 2,28; 1,76; 1,63$ и $1,49$ Å, которые относятся к продуктам гидратации: гидросиликатам кальция, тобермориту, кальциту и гидросульфатам алюмината кальция.

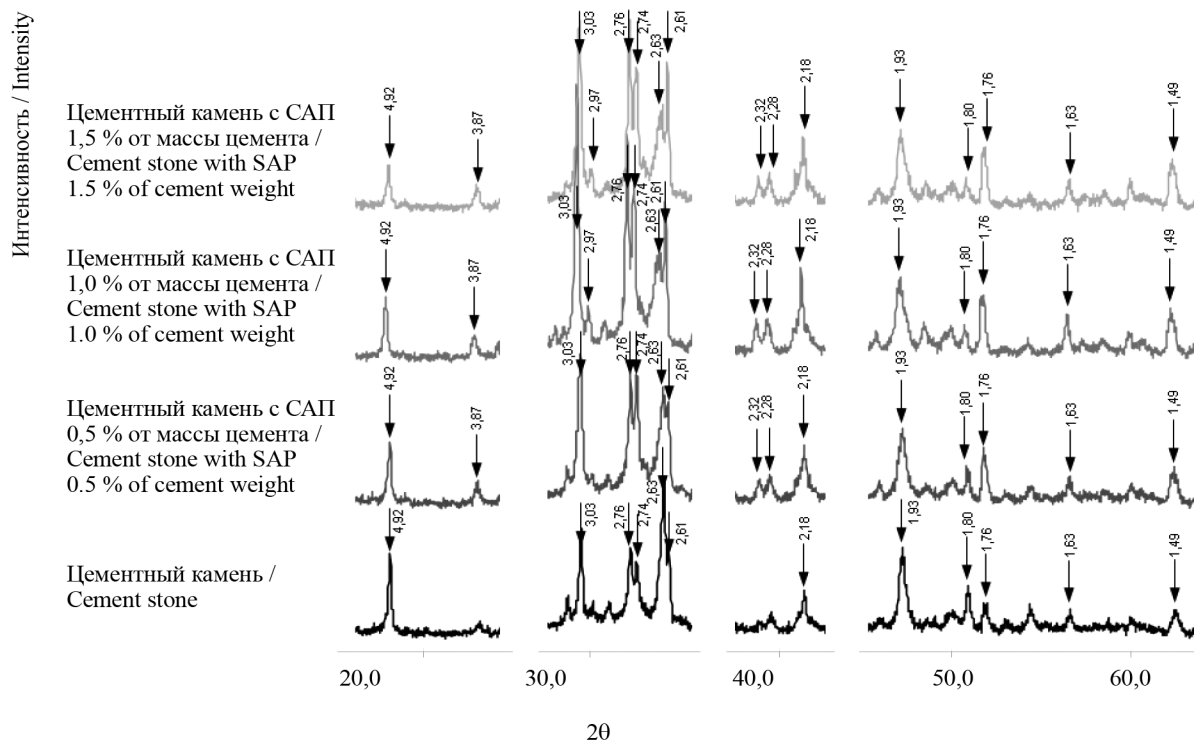


Рис. 3. Рентгенограмма ЦК с САП

Fig. 3. X-ray pattern of CS with SAP

Табл. 4. Суммарная тепловая энергия гидратации портландцемента, Дж/г

Table 4. Total hydration heat power of Portland cement, J/g

№	Количество САП, $\Sigma A/C$, % / Content of SAP, $\Sigma A/C$, %	Время гидратации, ч / Hydration time, h			
		24	48	62	86
1	0	127,9 $\pm$ 2,0	196,2 $\pm$ 3,0	212,5 $\pm$ 3,3	231,5 $\pm$ 3,6
2	0,5	118,5 $\pm$ 1,8	187,9 $\pm$ 2,9	204,1 $\pm$ 3,2	225,6 $\pm$ 3,5
3	1,0	115,5 $\pm$ 1,8	187,0 $\pm$ 2,9	203,4 $\pm$ 3,2	223,2 $\pm$ 3,5
4	1,5	103,2 $\pm$ 1,6	176,3 $\pm$ 2,7	193,2 $\pm$ 3,0	216,0 $\pm$ 3,4

Результаты калориметрических исследований свидетельствуют о незначительном уменьшении количества теплоты (на 4...12 %), выделившейся в процессе гидратации портландцемента, содержащего САП, по сравнению с контрольным составом. Наибольшее снижение наблюдается в начальный период гидратации портландцемента — 24 ч. С увеличением концентрации САП отмечается снижение интенсивности тепловыделения. Так, при увеличении концентрации САП с 0,5 до 1,0 % от массы портландцемента интенсивность выделения тепла снижается во всем интервале наблюдения от 1,4 до 6,0 Дж/(г · %), а при увеличении концентрации САП с 1,0 до 1,5 % от массы портландцемента — от 14,4 до 24,6 Дж/(г · %), т.е. в 4–10 раз больше.

Представленные данные калориметрических исследований свидетельствуют о некотором торможении процесса гидратации портландцемента в присутствии САП. Очевидно, что его влияние не ограничивается только первыми 86 часами процесса гидратации и твердения. Суммарная площадь аномалии для эндотермического эффекта S для ЦК в диапазоне температур 470–510 °C пропор-

циональна количеству портландита, что позволяет сделать вывод о количестве продуктов гидратации или степени гидратации вяжущего. С увеличением содержания САП площадь аномалии для эндотермического эффекта увеличивается, достигая максимума при содержании САП 1,0 % от массы портландцемента (рис. 4). Дальнейшее увеличение САП приводит к уменьшению S . Однако площадь аномалии для эндотермического эффекта при 1,5 % от массы портландцемента превышает значение S для контрольного состава.

Исследование образцов ЦК после длительного периода твердения (28 сут), проведенное с применением ДТА по энтальпии разложения портландита, показывает, что количества портландита в ЦК, твердеющем в присутствии САП, образуется больше.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа полученных экспериментальных данных проведем факторный анализ для выявления закономерностей влияния параметров структуры на ее качество, которое традиционно оценивается

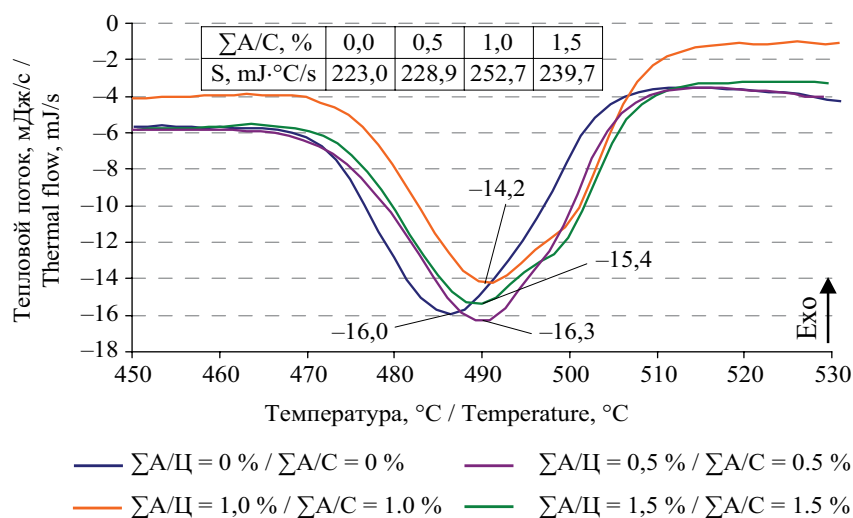


Рис. 4. Изменение теплового потока от содержания САП

Fig. 4. Change of heat flow from the SAP content

структурно-чувствительным свойством — прочностью. В качестве основных структурных параметров, характеризующих как ЦК — дисперсную систему, состоящую из совокупности кристаллов и аморфного твердого вещества (в том числе и рентгеноаморфного) и порового пространства; так и кристаллов продуктов гидратации портландцемента, будем использовать: для цементного камня — общую пористость, а для кристаллического вещества — плотность дислокаций.

Плотность дислокаций для кристаллов некоторых продуктов гидратации портландцемента определяли по формуле Селякова [24]. Выбор максимумов на рентгенограммах осуществляли для продуктов, на интенсивность которых влияние цементного клинкера минимально или можно исключить (табл. 5). Плотность линейных дефектов кристаллов (дислокация) равна:

$$\rho_d = 3/L_d^2, \quad (1)$$

где L_d — размер блоков кристаллической мозаики:

$$L_d = \lambda / (\theta \cdot \cos \theta), \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения медного анода (1,541 Å); θ — полуширина пика, град.; θ — брэгговский угол падения и отражения рентгеновского луча, град.

Для полученных экспериментальных и расчетных данных построены корреляционные зависимости: для ЦК — «прочность – пористость» (рис. 5), для кристаллов продуктов гидратации — «прочность – плотность дислокаций» (рис. 6).

Представленные корреляционные зависимости позволяют сделать следующие выводы о структурообразовании ЦК в присутствии САП:

1) САП оказывает влияние на концентрацию линейных дефектов в продуктах гидратации портландцемента (рис. 7). При этом наблюдается ожидаемое влияние концентрации дислокаций на прочность: с увеличением их концентрации прочность снижается (рис. 6);

2) влияние параметров структуры ЦК на его прочность имеет нетипичный характер: увеличение пористости также приводит к увеличению прочности. Необходимо отметить, что указанное наблюдается в исследованном интервале концентраций САП. За пределами данного интервала следует подтвердить дальнейшую реализацию установленного экспериментально-статистического факта.

При этом между рассматриваемыми структурными параметрами имеется статистическая связь, оцениваемая коэффициентом корреляции, равным $r = -0,62$, что указывает на наличие общей причины и направление изменения одного структурного параметра относительно другого. Естественной общей причиной, влияющей как на общую пористость, так и на плотность дислокаций в кристаллах продуктов гидратации, является наличие САП, а отрицательное значение коэффициента корреляции указывает на увеличение плотности дислокаций с уменьшением пористости и наоборот. Это является закономерным при предположении о выполнении САП функции физического барьера, влияющего на кристаллизацию продуктов гидратации и структурообразование ЦК.

Табл. 5. Размеры блоков-мозаики L_d и плотность дислокаций ЦК ρ_d

Table 5. Dimensions of mosaic blocks L_d and dislocation density CS ρ_d

№	ΣА/Ц, % / ΣА/С, %	d , Å	Интерпретация / Interpretation	$I/I_{\max}$, %	L_d , Å	ρ_d , 10^{11} см ⁻²
1	0	4,92	Портландит / Portlandite	100	447	1,50
2	0,5			84	406	1,82
3	1,0			79	406	1,82
4	1,5			54	497	1,22
5	0	3,87	Этtringит / Ettringite	71	300	3,33
6	0,5			96	300	3,33
7	1,0			95	250	4,79
8	1,5			100	322	2,90
9	0	1,93	Портландит / Portlandite	100	241	5,18
10	0,5			91	254	4,67
11	1,0			93	209	6,84
12	1,5			88	193	8,08

Примечание. d — межплоскостное расстояние; $I/I_{\max}$ — относительная интенсивность пика.

Note. d — interplanar distance; $I/I_{\max}$ — relative intensity of peak.

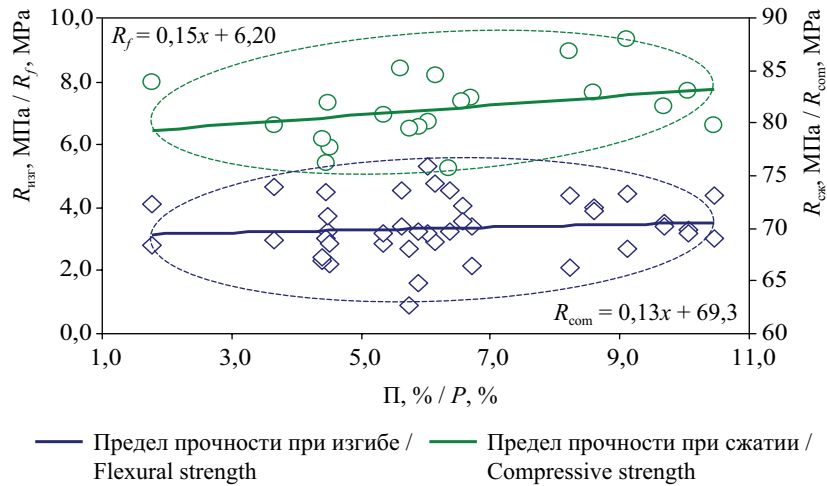


Рис. 5. Зависимость предела прочности ЦК от пористости

Fig. 5. Dependence of CS strength limit on porosity

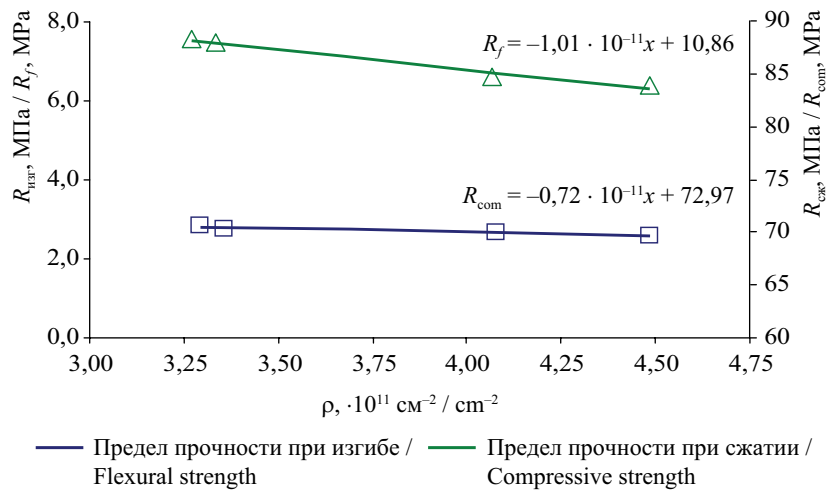


Рис. 6. Зависимость предела прочности ЦК от плотности дислокаций

Fig. 6. Dependence of the CS strength limit on the density of dislocations

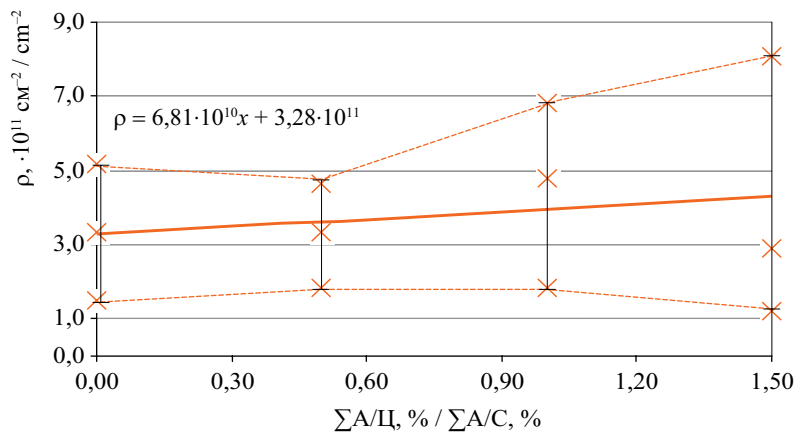


Рис. 7. Зависимость плотности дислокаций от содержания САП

Fig. 7. Dependence of density of dislocations on SAP content

Совместный анализ полученных корреляционных зависимостей (положительное влияние пористости на прочность ЦК и наличие типичной зависимости прочности от концентрации дефектов кристаллов) показывает наличие латентного фактора влияния параметров структуры ЦК на его прочность. Для его установления преобразуем классическое уравнение прочности, которое является модернизированным уравнением П.А. Ребиндера [26]:

$$R = R(1 - v), \quad (3)$$

где R_0 — прочность бездефектного материала, МПа; v_p — объемная доля пор; t — параметр, характеризующий фрактальную размерность процесса трещинообразования, к виду:

$$R = I_{st}^n \cdot I_f^m, \quad (4)$$

где I_{st} — структурный параметр; I_f — силовой параметр.

В данной формуле предполагается, что прочность ЦК зависит как от изменения параметров его структуры (структурный параметр), так и от адгезионной и когезионной прочности продуктов гидратации (силовой параметр). Для расчетов удобной формой представления формулы (4) является:

$$\frac{R_i}{R(0)} = \left(\frac{I_{st,i}}{I_{st,0}} \right)^n \left(\frac{I_{f,i}}{I_{f,0}} \right)^m, \quad (5)$$

где индексом «0» обозначены параметры контрольного состава материала.

Структурный параметр I_{st} определяется аналогично формуле (3):

$$I_{st,i} = 1 - v_p. \quad (6)$$

Для силового параметра выбор независимо экспериментально определяемой характеристики (свойства) затруднителен. Поэтому в расчетах целесообразно использовать его относительное изменение.

Значения показателей степени n и m рассчитываются при наличии не менее двух экспериментальных значений i и $i + 1$ (кроме контрольного):

$$m = \left(\ln \left(\frac{R_i}{R(0)} \right) - n \ln \left(\frac{I_{st,i}}{I_{st,0}} \right) \right) \cdot \ln \left(\frac{I_{f,i}}{I_{f,0}} \right)^{-1}; \quad (7)$$

$$n = \frac{\ln \left(\frac{R_{i+1}}{R(0)} \right) - B \ln \left(\frac{R_i}{R(0)} \right)}{\ln \left(\frac{I_{st,i+1}}{I_{st,0}} \right) - B \ln \left(\frac{I_{st,i}}{I_{st,0}} \right)}, \quad (8)$$

где B — коэффициент, характеризующий относительное изменение силового параметра:

$$B = \ln \left(\frac{I_{f,i+1}}{I_{f,0}} \right) \cdot \ln \left(\frac{I_{f,i}}{I_{f,0}} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Коэффициент B может изменяться в определенном диапазоне. Из формулы (8) следует, что B может быть рассчитан как с привлечением данных по прочности, так и данных по пористости:

$$B_{st} = \ln \left(\frac{I_{st,i+1}}{I_{st,0}} \right) \cdot \ln \left(\frac{I_{st,i}}{I_{st,0}} \right)^{-1};$$

$$B_R = \ln \left(\frac{R_{i+1}}{R(0)} \right) \cdot \ln \left(\frac{R_i}{R(0)} \right)^{-1}.$$

Причем очевидно, что $B \neq B_{st}$, так как в этом случае $n = \infty$. Отсюда возможны следующие варианты:

- 1) при $B > B_{st}$ и при $B > B_R$ значение $n > 0$;
- 2) при $B > B_{st}$ и при $B < B_R$ значение $n < 0$;
- 3) при $B < B_{st}$ и при $B > B_R$ значение $n < 0$;
- 4) при $B < B_{st}$ и при $B < B_R$ значение $n < 0$.

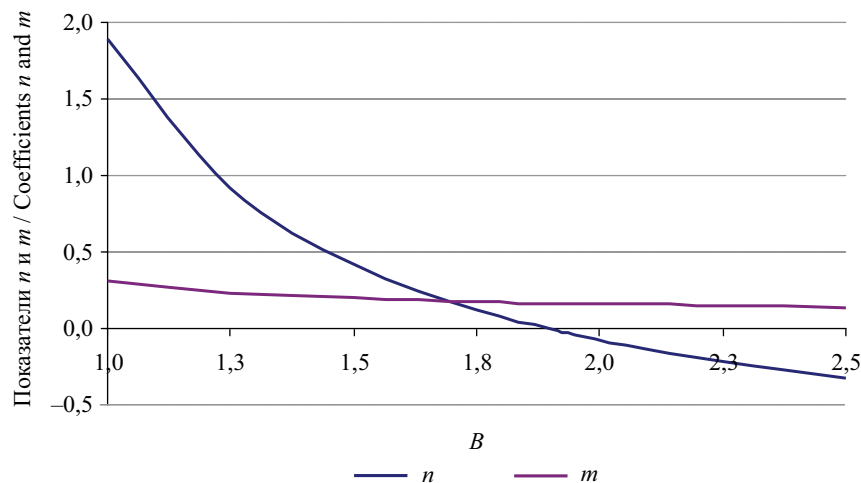
Анализ формулы (4) с учетом знака n указывает, что прочность материала может увеличиваться. Это возможно при выполнении следующих условий: 1) $n < 0$; 2) увеличение пористости материала.

С применением полученных экспериментальных данных и корреляционной зависимости «прочность — общая пористость» определим значения B_{st} и B_R и проведем расчет значений коэффициентов n и m (рис. 8). Значения $B_{st} = 2,05$, а $B_R = 1,90/1,99$ (в числителе значение B_R , рассчитанное для предела прочности при изгибе, в знаменателе — по пределу прочности при сжатии).

Из рис. 8 видно, что n в рассмотренном диапазоне значений B изменяется более значительно, чем показатель степени m . Точка перехода $n = f(B)$ к отрицательным значениям соответствует $B = B_R$. При этом при $B > B_R$, когда значение показателя степени $n < 0$, увеличение пористости материала приводит к положительному влиянию структурного параметра $I_{st} > 1$. Увеличение плотности дислокации указывает на уменьшение вклада в прочность силового параметра I_f , которое компенсируется положительным вкладом I_{st} . В совокупности это приводит к наблюдаемому росту прочности ЦК с одновременным ростом его пористости. При этом ключевым рецептурным фактором является структурообразование ЦК в присутствии САП в исследованном диапазоне концентраций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены зависимости реологических и механических свойств цементных материалов от концентрации САП, которые при заданных требованиях к свойствам материала могут быть использованы для определения оптимальной концентрации САП.

Рис. 8. Зависимости $n = f(B)$ и $m = f(B)$ Fig. 8. Dependencies $n = f(B)$ and $m = f(B)$

Установлено и дано объяснение нетипичному влиянию параметров структуры на прочность ЦК при использовании САП. Показано, что введение САП в исследуемом диапазоне концентраций приводит к комплексу структурных изменений, связанных с формированием большого количества продуктов гидратации, увеличению плотности линейных дефектов кристаллических фаз, а также

к перераспределению влияния структурно-силовых параметров на прочность ЦК.

Выявлено, что использование растворов САП является эффективным технологическим решением для обеспечения твердения бетона в неблагоприятных условиях. Применение САП с концентрацией до 1,5 % от массы портландцемента позволяет обеспечить требуемую подвижность смесей и сохранение прочности ЦК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 201. Pp. 278–285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
2. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А. и др. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46. DOI: 10.118720/CUBS.52.3
3. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 240. P. 117989. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
4. Mechtcherin V., Nerella V.N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933
5. Nerella V.N., Mechtcherine V. Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D) // *3D Concrete Printing Technology*. 2019. Pp. 333–347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6
6. Panda B., Singh B.G.V.P., Unluer C., Tan M.J. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. Pp. 610–619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
7. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 109. P. 102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992.
8. Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 02010. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199702010
9. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006

10. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 12–20.
11. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Physical and mechanical properties of cement stone with superabsorbent polyacrylate solutions // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 5 (89). С. 179–186. DOI: 10.18720/MCE.89.15
12. Dang J., Zhao J., Du Z. Effect of superabsorbent polymer on the properties of concrete // Polymers. 2017. Vol. 9. Issue 12. Pp. 672. DOI: 10.3390/polym9120672
13. Shan J., Guo S. Influence of super absorbent polymer on the mechanical property of high performance concrete // International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering. 2015. Pp. 154–157. DOI: 10.2991/ism3e-15.2015.40
14. Mignon A., Snoeck D., Dubruel P., Vlierberghe S.V., Belie N.D. Crack mitigation in concrete: superabsorbent polymers as key to success? // Materials. 2017. Vol. 10. Issue 3. P. 237. DOI: 10.3390/ma10030237
15. Клемм А.Дж., Алмейда Ф.С.Р., Сикора К.С. Применение супервпитывающих полимеров (SAP) в вяжущих материалах на основе многокомпонентных цементов // CPI — Международное бетонное производство. 2016. № 4. С. 44–52.
16. Schröfl Ch., Mechtcherine V., Gorges M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Issue 6. Pp. 865–873. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.011
17. Wang F., Hu Sh., Li X., Cheng H. Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 81. Pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.12.004
18. Liu H., Bu Y., Sanjayan J.G., Nazari A., Shen Z. Suitability of polyacrylamide superabsorbent polymers as the internal curing agent of well cement // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 253–260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.217
19. Yang J., Liu L., Liao Q., Wu J., Li J., Zhang L. Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 201. Pp. 401–407. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.197
20. Mechtcherine V., Reinhardt H.-W. Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction. RILEM. State of the Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP. Paris: Springer, 2012. 170 p. DOI: 10.1007/978-94-007-2733-5
21. Lura P., Durand F., Loukili A., Kovler K., Janssen O. Compressive strength of cement pastes and mortars with superabsorbent polymers. RILEM Proc. PRO. RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 2006. Vol. 52. Pp. 117–126.
22. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Выбор суперабсорбирующего полимерного гидрогеля для цементных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 64–70. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.64-70
23. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимов И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. М.: МГСУ, 2013. 152 с.
24. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). С. 36–42.
25. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 347 с.

Поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Евгений Валерьевич Королев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 351849, Scopus: 37099331400, ResearcherID: K-8134-2013, ORCID: 0000-0003-0815-4621; KorolevEV@mgsu.ru;

Тхань Куй Зыонг — аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 918907; info@nocnt.ru;

Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 616006, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 201:278-285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
2. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenja A.N., Kim A.A. et al. 3D-printing in construction. *Construction of unique buildings and structures*. 2017; 1(52):27-46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3 (rus.).
3. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 240:117989. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
4. Mechtcherin V., Nerella V.N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*. 2019; 107:102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933
5. Nerella V.N., Mechtcherine V. Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). *3D Concrete Printing Technology*. 2019; 333-347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6
6. Panda B., Singh B.GVP, Unluer C., Tan M.J. Synthesis and characterization of one-part geopolymer for extrusion based 3D concrete printing. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 220:610-619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
7. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*. 2020; 109:102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992
8. Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702010
9. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
10. Pustovgar A.P., Adamceovich A.O., Volkov A.A. Technology and organization of additive construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 9:12-20. (rus.).
11. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Physical and mechanical properties of cement stone with superabsorbent polyacrylate solutions. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 5(89):179-186. DOI: 10.18720/MCE.89.15
12. Dang J., Zhao J., Du Z. Effect of superabsorbent polymer on the properties of concrete. *Polymers*. 2017; 9(12):672. DOI: 10.3390/polym9120672
13. Shan J., Guo S. Influence of super absorbent polymer on the mechanical property of high performance concrete. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering*. 2015; 154-157. DOI: 10.2991/ism3e-15.2015.40
14. Mignon A., Snoeck D., Dubruel P., Vlierberghe S.V., Belie N.D. Crack mitigation in concrete: superabsorbent polymers as key to success? *Materials*. 2017; 10(3):237. DOI: 10.3390/ma10030237
15. Klemm A.Dzh., Almejda F.S.R., Sikora K.S. The use of super absorbent polymers (SAP) in binders based on multicomponent cements. *CPI — International Concrete Production*. 2016; 4:44-52. (rus.).
16. Schröfl Ch., Mechtcherine V., Gorges M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(6):865-873. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.011
17. Wang F., Hu Sh., Li X., Cheng H. Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2016; 81:112-121. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.12.004
18. Liu H., Bu Y., Sanjayan J.G., Nazari A., Shen Z. Suitability of polyacrylamide superabsorbent polymers as the internal curing agent of well cement. *Construction and Building Materials*. 2016; 112:253-260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.217
19. Yang J., Liu L., Liao Q., Wu J., Li J., Zhang L. Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar. *Construction and Building Materials*. 2019; 201:401-407. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.197
20. Mechtcherine V., Reinhardt H.-W. *Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction*. RILEM. State of the Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP. Paris, Springer, 2012; 170. DOI: 10.1007/978-94-007-2733-5
21. Lura P., Durand F., Loukili A., Kovler K., Janssen O. *Compressive strength of cement pastes and mortars with superabsorbent polymers*. RILEM Proc. PRO. RILEM Publications S.A.R.L. Bagneux, France, 2006; 52:117-126.
22. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Zyong T.K. The choice of superabsorbent polymer hydrogel for cement systems. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 7:64-70. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.64-70 (rus.).
23. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimov I.N. Structure formation and structural strength of cement composites. Moscow, MGSU, 2013; 152. (rus.).

24. Adamceovich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. The use of calorimetry to predict the growth of strength of cement systems accelerated hardening. *Civil Engineering Journal*. 2013; 3(38):36-42. (rus.).

25. Rebinder P.A. *Physico-chemical mechanics of dispersed structures*. Moscow, Science, 1966; 347. (rus.).

Received April 13, 2020.

Adopted in a revised form on May 5, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Evgenij V. Korolev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Building Materials and Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 351849, Scopus: 37099331400, ResearcherID: K-8134-2013, ORCID: 0000-0003-0815-4621; KorolevEV@mgsu.ru;

Thanh Qui Duong — postgraduate of Department of Building Materials and Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 918907; info@nocnt.ru;

Aleksandr S. Inozemtcev — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Department of Building Materials and Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 616006, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.

Методы интенсификации биологической очистки с целью удаления тяжелых металлов

И.И. Иваненко, А.М. Новикова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из методов повышения энергетической и экологической эффективности работы биологических очистных сооружений может быть применение в технологии очистки сточных вод микроорганизмов, способных использовать в качестве терминальных акцепторов электронов химические элементы с переменной валентностью.

Материалы и методы. Использовали аналитическое обобщение результатов — обзор литературных источников, проведение лабораторных исследований по стандартным и современным методикам с применением аналитического оборудования.

Результаты. Cr(6+) Mn(4+), которые содержатся в высоких концентрациях в сточных водах различных производств, заслуживают внимания, как терминальные акцепторы электронов. В лабораторных условиях исследована способность неадаптированной аэробной бактерии рода *Acinetobacter* восстанавливать Mn(4+), Cr(6+) в культуральной среде под слоем вазелинового масла. В ходе лабораторных исследований изучены различные аспекты Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции, а именно: хроматредуцирующая способность бактерии — получены кривые изменения концентрации Cr(6+) в процессе хроматредукции; влияние концентрации Cr(6+) и Mn(2+) на процесс хромат- и марганец-редукции, определена эффективность очистки воды от Cr(6+); изменение последовательности редукции при одновременном присутствии их в культуральной среде, установлена последовательность восстановления Cr(6+) и Mn(4+) при совместном их культивировании с бактериями. Для подтверждения полученных результатов проведена серия опытов для бактерий рода *Pseudomonas*.

Выводы. Опыты показали, что исследованные аэробные бактерии — *Acinetobacter*, *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19. способны переходить к анаэробному дыханию при определенных условиях. Установлено, что возможно использование Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции микроорганизмами различных таксонометрических групп в анаэробных условиях культивирования в качестве терминальных акцепторов электронов и определена последовательность их редукции: денитрифицирующие бактерии используют MnO₂ значительно эффективнее, чем Cr(6+). Микробная хроматредукция предшествует Mn(4+)-восстановлению, а продукты метаболизма менее токсичны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биологическая очистка, облигатные аэробы, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, восстановление Mn(4+), восстановление Cr(6+), последовательность восстановления

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству СПбГАСУ за предоставление гранта на исследование, а также всем рецензентам и авторскому коллективу издания за публикацию данных материалов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иваненко И.И., Новикова А.М. Методы интенсификации биологической очистки с целью удаления тяжелых металлов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 847–858. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.847-858

Methods of biological treatment intensification aimed at removal of heavy metals

Irina I. Ivanenko, Antonina M. Novikova

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The application of microorganisms, capable of using chemical elements with variable valency as terminal electron acceptors, in the wastewater treatment technology can improve the ecological and energy efficiency of biological treatment plants.

Materials and methods. The co-authors employed the analytical generalization of findings, including the overview of literary sources, laboratory researches involving standard and advanced methodologies and analytical equipment.

Results. Cr(6+) Mn(4+), highly concentrated in wastewaters of versatile production facilities, deserve attention as terminal electron acceptors. The ability of *Acinetobacter*, a non-adapted aerobic bacteria, to reduce Mn(4+), Cr(6+) in the culture medium under a layer of vaseline oil, was studied in the laboratory environment. In the course of the laboratory research, different aspects of Cr(6+)- and Mn(4+) reduction were studied, namely, the bacteria's chromate reduction ability, as Cr(6+) concentration change curves were obtained for the process of reduction; the influence of Cr(6+) and Mn(2+) reductions

on processes of chromate and manganese reduction was identified; water treatment efficiency boosted by Cr(6+) was identified; changes in the reduction sequence in case of their co-presence in the culture medium were checked; the sequence of Cr(6+) and Mn(4+) reduction in case of their co-cultivation together with the bacteria was identified, as well. A succession of experiments with *Pseudomonas* bacteria was held to validate the results.

Conclusions. The experiments have proven that aerobic bacteria, including *Acinetobacter*, *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19, can develop anaerobic respiration ability under certain conditions. The co-authors have identified that Cr(6+)- and Mn(4+) reduction is applicable by microorganisms, belonging to varied taxonomic groups, in anaerobic cultivation environments, if Cr(6+)- and Mn(4+) act as terminal acceptors of electrons; the co-authors have also reconstructed the reduction sequence: denitrifying bacteria use MnO₂ much more efficiently than Cr(6+). Microbial chromate reduction precedes Mn(4+) reduction, while products of their metabolism are less toxic.

KEYWORDS: biological treatment, obligate aerobes, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, Mn(4+) reduction, Cr(6+) reduction, reduction sequence

Acknowledgements. The co-authors would like to express gratitude to the executives of the St. Petersburg University of Architecture and Civil Engineering for the research grant and to all reviewers and the editorial team for the publication of this material.

FOR CITATION: Ivanenko I.I., Novikova A.M. Methods of biological treatment intensification aimed at removal of heavy metals. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):847-858. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.847-858 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Среди современных методов очистки промышленных, бытовых и ливневых сточных вод биологический способ был и, вероятнее всего, останется в будущем одним из наиболее экологически приемлемых и экономически выгодных [1–5]. Этот метод базируется на способности гетеротрофных микроорганизмов использовать органические соединения как источник питания, а также переводить некоторые минеральные примеси (в частности, тяжелые металлы) в нерастворимое состояние. Для реализации метода важное значение имеет селекция микроорганизмов-деструкторов, способных:

- 1) эффективно минерализовать органические соединения, в том числе антропогенного происхождения, или превращать их в нетоксичные, доступные другим гидробионтам вещества;
- 2) использовать для окисления загрязнений имеющиеся в воде или специально внесенные соединения и элементы с переменной валентностью в качестве акцепторов электронов;
- 3) создавать работоспособные биоценозы, например, при использовании метода погружных загрузок для биологической очистки, обладающих способностью прикрепляться к нерастворимому в воде носителю.

Современные достижения микробиологии, биохимии и биотехнологии, а также резкий рост стоимости энергии и возрастающая конкуренция на рынке очистки сточных вод заставляют по-новому оценить возможности аноксидных и анаэробных методов очистки сточных вод. В последние годы для обработки сточных вод, которые содержат очень ядовитые соединения, приобрел большое значение метод с использованием специально селекционированных высокоадаптированных штаммов микроорганизмов. Они, по сравнению с активным илом, обладают большей стойкостью к токсичному действию загрязняющих веществ и могут потреблять

их как источник углерода и энергии [6, 7]. Использование таких штаммов в анаэробной/аноксидной и аэробной биотехнологиях позволит достичь желаемых результатов при обработке сточных вод со сложным составом. Окислительную способность сооружений биологической очистки сточных вод можно повысить путем применения штаммов бактерий, которые способны значительно снижать окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) среды, используя имеющиеся в воде или специально внесенные неорганические соединения и элементы с переменной валентностью в качестве терминальных акцепторов электронов при окислении органических загрязнений. В отличие от более высокоорганизованных существ, микроорганизмы (преимущественно бактерии), кроме кислорода, как акцептора электронов, с этой целью могут использовать при анаэробном дыхании неорганические соединения азота, серы, хрома, железа, марганца, хлора, селена, карбонаты, теллур и другие элементы с высокой и переменной степенью окисления [8–13]. На практике очистка сточных вод селекционированными культурами бактерий стала возможна благодаря применению в биореакторах высокой концентрации микроорганизмов, необходимых для интенсивной очистки воды [14]. Для очистки воды наиболее приемлемым методом иммобилизации является ассоциация микроорганизмов-деструкторов путем адгезии на носителе, т.е. «пассивная» иммобилизация, которая базируется на использовании естественных свойств микроорганизмов прикрепляться к поверхности разных твердых субстратов или же заселять пористые материалы. Среди существующих методов иммобилизации бактерий на носителях процесс колонизации клетками твердой поверхности — более простой и естественный [15, 16]. Он позволяет получать системы, которые содержат наибольшее количество живых клеток, и полностью сохранять их биохимическую активность [17–21]. В качестве носителей могут ис-

пользоваться материалы разной природы и формы (естественные и синтетические, насыпные, структурированные материалы и т.п.).

Удерживать микробную биомассу в очистном сооружении возможно путем иммобилизации ее на волокнистых носителях с высокой удельной поверхностью адгезии¹ [22]. Это дает возможность:

- равномерно распределять активную биомассу по всему объему очистного сооружения, что способствует его эффективному использованию;
- предотвращать вымывание микроорганизмов из биореактора при резких изменениях скорости подачи стока или повышении концентрации токсичных веществ;
- создавать наиболее целесообразную прямую систему очистки сточных вод с высокими концентрациями биомассы.

Волокнистые носители эффективны как для иммобилизации на них гидробионтов, которые ведут прикрепленный образ жизни, так и удерживания свободноплавающих гидробионтов — активных и пассивных фильтраторов, а также многочисленных водных хищников, которые образуют разветвленные трофические цепи. Одно из необходимых условий применения иммобилизованных микроорганизмов в разнообразных биотехнологических процессах — это прочность закрепления и удержания их на поверхности носителя. Доказано, что на положительно заряженных, в отличие от незаряженных волокон, образование биослоя микроорганизмов происходит быстрее, а клетки удерживаются более надежно, чем на отрицательно заряженных волокнах. Возможность формирования на волокнистых носителях пространственной структуры микроорганизмов является значительным технологическим преимуществом в сравнении с иммобилизованной на сыпучих носителях биомассой [23].

Для удаления ионов тяжелых металлов из воды необходимо организовывать локальную обработку промышленных сточных вод с использованием анаэробных микроорганизмов, которые имеют высокую популяционную стойкость. Это позволит избежать загрязнения избыточного активного ила традиционных биологических очистных сооружений тяжелыми металлами, благодаря чему избыточную биомассу после соответствующей обработки возможно использовать в сельском хозяйстве как полноценное удобрение.

Заслуживает отдельного внимания терминальный акцептор электронов при анаэробном дыхании бактерий Cr(6+), который содержится в высоких концентрациях в сточных водах металлургических, автомобилестроительных, станкостроительных, авиастроительных, а также текстильных, лакокрасочных, химических, бумажных, спичечных и мно-

гих других производств. Даже в незначительной концентрации Cr(6+) является токсичным для активного ила традиционных биологических очистных сооружений, тогда как чистые культуры бактерий некоторых таксономических групп способны восстанавливать его соединения, используя их как акцепторы электронов при дыхании.

Впервые возможность биологической детоксикации хроматсодержащих стоков была показана В. Кореньковым и В. Романенко, которые выделили и описали бактериальную культуру, способную восстанавливать Cr(6+) до Cr(3+) [24]. Позднее в литературе появились сообщения о существовании других микроорганизмов, стойких к токсичному действию хроматов. В этих работах отмечается как отсутствие, так и существование связи между стойкостью бактерий к Cr(6+) и способностью редуцировать его в Cr(3+).

Е.И. Квасников и другие в своих исследованиях пришли к выводу, что хроматвосстанавливающая способность характерна для представителей родов *Aeromonas*, *Esherichia*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* и она коррелируется с их высокой стойкостью к значительному содержанию иона хрома в среде. Авторами также селекционирован и описан новый вид высокоактивного хроматредуцирующего штамма — *Aeromonas dechromatca* [25].

Было обнаружено, что наиболее распространена способность восстанавливать Cr(6+) у бактерий рода *Pseudomonas*, причем проводят этот процесс как адаптированные, так и неадаптированные клетки, а блокирование синтеза белка цианидом не предотвращает восстановление хрома, что свидетельствует о неиндуцибельности хроматредуктазы. Из исследованных 650 штаммов бактерий рода *Pseudomonas* лишь 0,4 % культур имеют высокую хроматредуцирующую способность, которая коррелирует с резистентностью клеток к Cr(6+) при концентрации в среде до 100 мг/дм³. Все изолированные штаммы относятся к денитрифицирующим псевдомонадам. Наиболее стойкими оказались представители видов *P. fluorescens* и *P. putida*. Однако среди не способных к денитрификации штаммов не были обнаружены хроматредуцирующие бактерии [26].

Стоит отметить, что хромредуцирующие бактерии в последнее время стали объектом изучения многих исследователей. Описаны новые штаммы бактерий, их свойства и биотехнологии, в которых использованы эти культуры [27, 28]. В научной литературе также описана способность *A. calcoaceticus* восстанавливать Mn(4+) до Mn(2+) [29–31]. Штамм с чрезвычайно высокой Mn(4+)-восстанавливающей способностью выделен из марганцевых руд. Авторы работы утверждают, что культура *A. calcoaceticus* редуцирует Mn(4+) «...прямым энзиматическим путем, и фермент, который осу-

¹ Андриамирадо Л. и др. Технический справочник по обработке воды: в 2-х т. Т. 1 / пер. с фр. СПб. : Новый журнал, 2007. 1200 с.

ществляет этот процесс, есть нитратредуктаза»². Штамм *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1 является деструктором нефтепродуктов и не адаптирован ни к Mn(4+), ни к Cr(6+) [32].

Задачей проведенных в лабораторных условиях исследований являлось установление возможности использования Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции культурами микроорганизмов различных таксонометрических групп в анаэробных условиях культивирования, при непрерывном процессе в лабораторном биореакторе с волокнистой загрузкой, и установление последовательности их редукции. В качестве бактерий выбраны:

- *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1;
- *Pseudomonas* — *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19.

В ходе лабораторных исследований был проведен ряд опытов, позволивших изучить различные аспекты Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции:

Опыт 1. Изменение концентрации Cr(6+) в процессе хроматредукции культурой *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1 при различных его концентрациях в среде культивирования.

Опыт 2. Исследование хроматредуцирующей способности культуры *A. calcoaceticus* Ac-1 в условиях непрерывного культивирования.

Опыт 3. Изменение концентрации Mn(2+) в процессе редукции Mn(4+) культурой *A. calcoaceticus* Ac-1 при различных количествах MnO₂ в культуральной среде биоблока.

Опыт 4. Изменение последовательности Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции при одновременном присутствии этих соединений в культуральной среде с микроорганизмом *A. calcoaceticus* Ac-1.

Опыт 5. Для подтверждения последовательности Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции были проведены исследования с денитрифицирующими штаммами бактерий рода *Pseudomonas* — *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19.

² Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. Справочник биохимика. М.: Мир, 1991. 542 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опыт 1. Исследование проводили в минеральной среде М9 с микроэлементами под слоем стерильного вазелинового масла. Источником питания и донором электронов служила глюкоза в концентрации 1,6 мг/дм³. Кислород из раствора не удаляли. Биомассу для посева наращивали на МПА [33–35].

Опыт 2. Исследование хроматредуцирующей способности культуры *A. calcoaceticus* Ac-1 в условиях непрерывного культивирования проводили в лабораторном биореакторе (цилиндрическая емкость высотой 45 см и диаметром 7 см) с рабочим объемом 1,25 дм³. В установке равномерно развешивали волокнистый носитель в количестве 8 г/дм³ и заполняли суспензией клеток *A. calcoaceticus* Ac-1 в разбавленной дистиллированной водой (1:10) среде М9, которая содержала 8 мг/дм³ Cr(6+). Концентрация биомассы составляла 300 мг/дм³. Вазелиновое масло на поверхность раствора не наносили, т.е. в верхней части сооружения культуральная среда контактировала с воздухом. Биореактор оставляли без протока до полной редукции Cr(6+). Через семь суток культивирования, после уменьшения количества Cr(6+) до нуля, с помощью перистальтического насоса была установлена подача модельного раствора с Cr(6+) в нижнюю часть биореактора. В вытекающей из верхней части биореактора жидкости определяли концентрацию Cr(6+) и осуществляли контроль чистоты культуры путем посева на МПА. Нагрузку постепенно увеличивали от 1,5 до 8 мг/дм³.

Опыт 3. Вносили в плоскодонную колбу 100 мл культуральной среды и 6, 30, 100 мг MnO₂, через девять суток определяли содержание Mn(2+). Начальная концентрация *A. calcoaceticus* Ac-1 составляла во всех опытах 350 мг/дм³.

Опыт 4. Начальное количество внесенного MnO₂ составляло около 400 мг, Cr(6+) — 10 мг/дм³, концентрация *A. calcoaceticus* Ac-1 — 360 мг/дм³.

Опыт 5. Исследования проводили с начальным количеством веществ и бактерий, представленным в табл. 1.

Табл. 1. Начальное количество внесенных веществ в пятом опыте

Table 1. Initial amount of substances added within the framework of Experiment 5

Серия опытов / Succession of experiments	Начальное количество внесенного MnO ₂ , мг / Initial amount of added MnO ₂ , in mg	Начальное количество внесенного Cr(6+), мг/дм ³ / Initial amount of added Cr(6+), in mg/dm ³	Концентрация бактерий рода <i>Pseudomonas</i> (по сухому веществу), мг/дм ³ / <i>Pseudomonas</i> bacterium concentration (in terms of the dry substance)
а)	120	15	<i>P. aeruginosa</i> P-1-350
б)	150	15	<i>P. fluorescens</i> var. <i>Pseudo-iodinum</i> P-11-300
в)	110	16	<i>P. Mendocina</i> P-13-320
г)	110	13	<i>P. stutzeri</i> P-19-330

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт 1. На рис. 1 показано изменение концентрации $\text{Cr}(6+)$ в процессе хроматредукции культурой *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1 при различных его концентрациях в среде культивирования. При концентрации биомассы 320 мг/дм^3 (по сухому веществу) восстановление 10 мг/дм^3 $\text{Cr}(6+)$ происходит за 12–14 суток, 20 мг/дм^3 $\text{Cr}(6+)$ редуцируется за 18, а 30 мг/дм^3 — за 30 суток культивирования. В ходе исследований наблюдался незначительный прирост биомассы, например, при восстановлении 30 мг/дм^3 $\text{Cr}(6+)$ концентрация биомассы составляла 460 мг/дм^3 (по сухому веществу).

Следовательно, проведенные исследования показали, что *A. calcoaceticus* Ac-1 способна восстанавливать $\text{Cr}(6+)$, используя его как терминальный акцептор электронов. $\text{Cr}(6+)$ -редуцирующая способность неадаптированного штамма такая же, как и у других исследованных ранее культур — представителей разных таксономических групп.

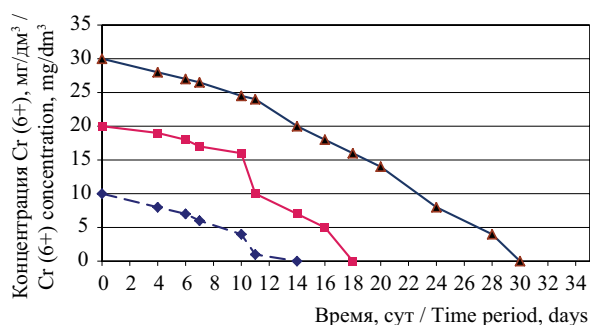


Рис. 1. Изменение концентрации $\text{Cr}(6+)$ в процессе хроматредукции культурой *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1 при различных его концентрациях в среде культивирования

Fig. 1. Changes in the concentration of $\text{Cr}(6+)$ in the process of chromate reduction using different concentrations of the *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1 culture in the cultivation solution

Опыт 2. Результаты работы биореактора в ходе второго эксперимента — изучение эффективности очистки воды от $\text{Cr}(6+)$ культурой *A. calcoaceticus* Ac-1 в лабораторном биореакторе приведены в табл. 2.

Как видно из данных таблицы, при нагрузке на сооружение от $1,5$ до $5,5 \text{ мг/дм}^3$ в сутки по $\text{Cr}(6+)$ культура очищает воду на 100 %. В очищенной воде $\text{Cr}(6+)$ отсутствует. Увеличение нагрузки на сооружение до $7,0 \text{ мг/дм}^3$ в сут (13–15 сут — время непрерывного культивирования от начала исследований) приводит к снижению эффективности редукации на 7 %. Концентрация $\text{Cr}(6+)$ в очищенной воде составляет $0,5 \text{ мг/дм}^3$. То есть за сутки культура *A. calcoaceticus* Ac-1 восстанавливает $6,5 \text{ мг/дм}^3$ $\text{Cr}(6+)$. Такая редуцирующая способность *A. calcoaceticus* Ac-1 значительно ниже описанных в научной литературе. Например, *E. Coli* в лабораторном биореакторе снимает до 20 мг/дм^3 $\text{Cr}(6+)$ за сут [9–11]. Это объясняется тем, что в отличие от *E. Coli*, культура *A. calcoaceticus* Ac-1 не адаптирована к $\text{Cr}(6+)$. Кроме того, лабораторный биореактор, который был использован, имел низкую концентрацию биомассы и недостаточно хорошие гидродинамические и массообменные свойства. На хроматредуцирующую способность культуры также негативно влиял кислород как терминальный акцептор электронов, который находился в модельном растворе и поступал в культуральную среду в результате диффузии из воздуха в верхней части биореактора.

Опыт 3. Чрезвычайно активной культура *A. calcoaceticus* Ac-1 оказалась в присутствии $\text{Mn}(4+)$, как терминального акцептора электронов (рис. 2). При внесении в колбу из 100 мл культуральной среды 6 мг MnO_2 через девять суток образовалось 21 мг/дм^3 $\text{Mn}(2+)$. Увеличение количества внесенного MnO_2 до 30 мг приводит к образованию 120 мг/дм^3 $\text{Mn}(2+)$ за тот же промежуток времени. И наибольшее количество $\text{Mn}(2+)$ образовалось при внесении в культуральную среду 100 мг MnO_2 , за девять суток концентрация $\text{Mn}(2+)$ достигла 390 мг/дм^3 .

Табл. 2. Эффективность очистки воды от $\text{Cr}(6+)$ культурой *A. calcoaceticus* Ac-1 в лабораторном биореакторе

Table 2. Efficiency of $\text{Cr}(6+)$ removal from the water using the *A. calcoaceticus* Ac-1 culture in the laboratory bioreactor

Длительность процесса, сут / Process time, days	Нагрузка по $\text{Cr}(6+)$, мг/дм^3 сут / $\text{Cr}(6+)$ loading, in mg/dm^3 a day	Количество восстановленного $\text{Cr}(6+)$, мг/дм^3 сут / Amount of reduced $\text{Cr}(6+)$, in mg/dm^3 a day	Эффективность очистки, % / Treatment efficiency, %
1–3	1,5	1,5	100
4–6	3	3	100
7–9	4	4,0	100
10–12	5,5	5,5	100
13–15	7,0	6,5	93
16–18	8,0	7,0	87,5

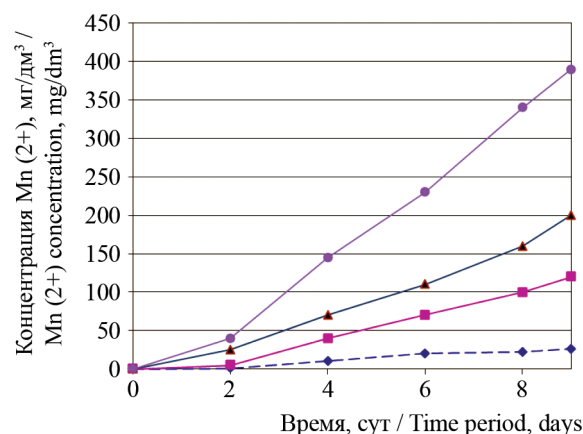


Рис. 2. Изменение концентрации $Mn(2+)$ в процессе редукции $Mn(4+)$ культурой *A. calcoaceticus* *Ac-1* при различных количествах MnO_2 в 100 cm^3 среды

Fig. 2. Changes in the concentration of $Mn(2+)$ in the process of $Mn(4+)$ reduction using the *A. calcoaceticus* *Ac-1* culture at different amounts of MnO_2 per 100 cm^3 of the medium

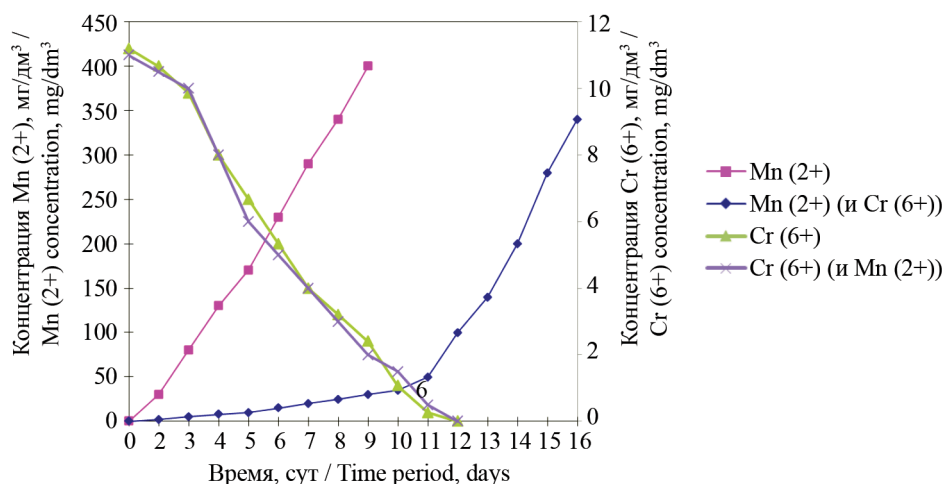


Рис. 3. Изменение концентрации $Cr(6+)$ и $Mn(4+)$ в процессе редукции их культурой *A. calcoaceticus* *Ac-1* при совместном присутствии в среде и по отдельности

Fig. 3. Changes in the concentration of $Cr(6+)$ and $Mn(4+)$ in the process of their reduction using the *A. calcoaceticus* *Ac-1* culture in case of their co-presence in the medium and in case of their presence in isolation from one another

Таким образом, из представленных опытов можно сделать заключение, что неадаптированная культура *A. calcoaceticus* *Ac-1* при ограничении доступа кислорода в среду способна эффективно восстанавливать $Mn(2+)$, используя его как терминальный акцептор электронов.

Опыт 4. В данном опыте была исследована последовательность $Cr(6+)$ и $Mn(4+)$ редукции при одновременном присутствии этих соединений в среде культуры *A. calcoaceticus* *Ac-1*. На рис. 3 приведены кривые изменения концентраций $Cr(6+)$ и $Mn(4+)$.

Как видно из кривых 1 и 2, период хроматредукции — практически одинаковый как в присутствии MnO_2 , так и без него, и составляет 12 сут. Совсем другая картина наблюдается при восстановлении $Mn(4+)$ в присутствии $Cr(6+)$

и без него. Интенсивная $Mn(4+)$ -редукция культурой *A. calcoaceticus* *Ac-1* начинается лишь после полного восстановления $Cr(6+)$.

Опыт 5. Для подтверждения последовательности $Cr(6+)$ и $Mn(4+)$ -редукции, полученной в предыдущем опыте, были проведены исследования с денитрифицирующими штаммами бактерий рода *Pseudomonas* — *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19.

Как видно из рис. 4–7, аналогичная полученной редокс (окислительно-восстановительная) последовательность *A. calcoaceticus* *Ac-1* присуща и денитрифицирующим псевдомонадам — сначала восстанавливается $Cr(6+)$, а потом $Mn(4+)$.

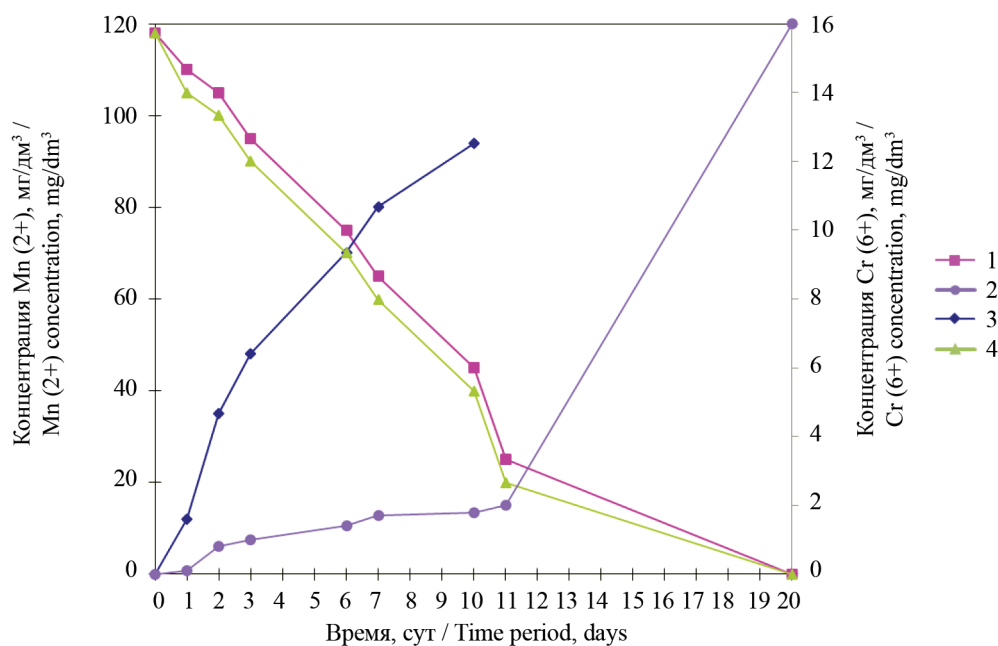


Рис. 4. Последовательность изменения концентрации $\text{Cr}(6+)$ (1, 4) и $\text{Mn}(4+)$ (2, 3) в процессе хромат и $\text{Mn}(4+)$ -редукции культурой *P. aeruginosa P-1* при совместном их присутствии (1, 2) и отдельно (3, 4) в среде биоблока

Fig. 4. The sequence of changes in the concentration of $\text{Cr}(6+)$ (1, 4) and $\text{Mn}(4+)$ (2, 3) in the process of chromate and $\text{Mn}(4+)$ reduction using the *P. aeruginosa P-1* culture in case of their co-presence (1, 2) and in case of their presence in isolation from one another (3, 4) in the medium

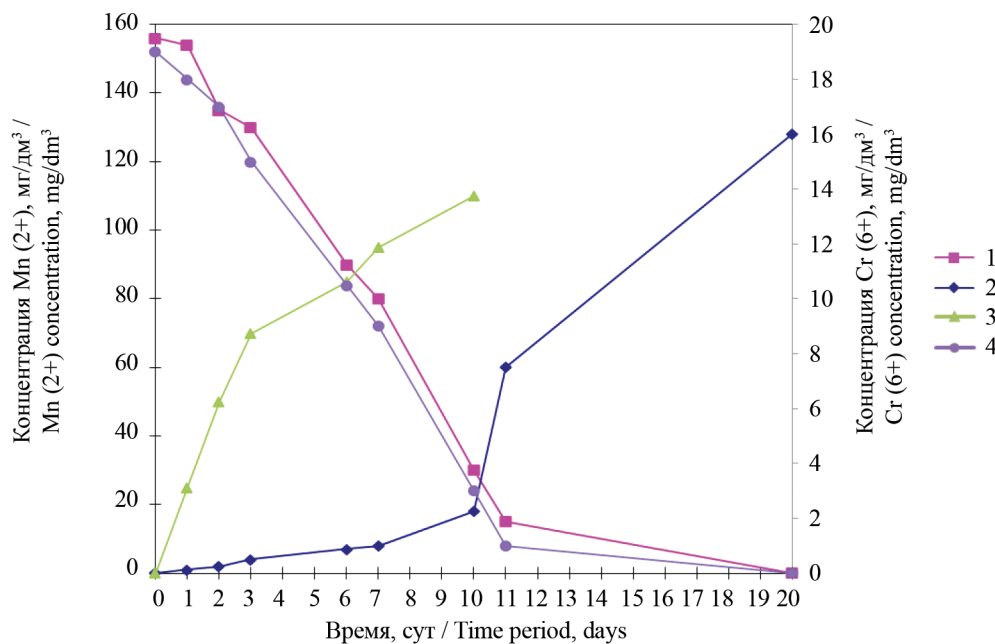


Рис. 5. Последовательность изменения концентрации $\text{Cr}(6+)$ (1, 4) и $\text{Mn}(4+)$ (2, 3) в процессе хромат и $\text{Mn}(4+)$ -редукции культурой *P. fluorescens var. Pseudo-iodinum P-11* при совместном их присутствии (1, 2) и отдельно (3, 4) в среде биоблока

Fig. 5. The sequence of changes in the concentration of $\text{Cr}(6+)$ (1, 4) and $\text{Mn}(4+)$ (2, 3) in the process of chromate and $\text{Mn}(4+)$ reduction using *P. fluorescens var. Pseudo-iodinum P-11* in case of their co-presence (1, 2) and in case of their presence in isolation from one another (3, 4) in the medium

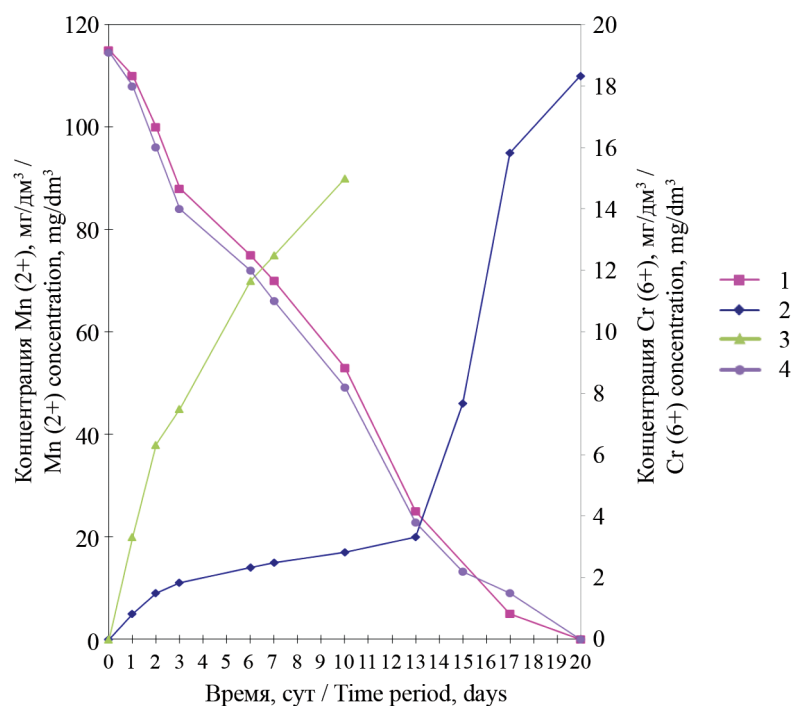


Рис. 6. Последовательность изменения концентрации Cr(6+) (1 и 4) и Mn(4+) (2, 3) в процессе хромат и Mn(4+)-редукции культурой *P. Mendocina P-13* при совместном их присутствии (1, 2) и отдельно (3, 4) в среде биоблока

Fig. 6. The sequence of changes in the concentration of Cr(6+) (1 and 4) and Mn(4+) (2, 3) in the process of chromate and Mn(4+) reduction using the *P. Mendocina P-13* culture in case of their co-presence (1, 2) and in case of their presence in isolation from one another (3, 4) in the medium

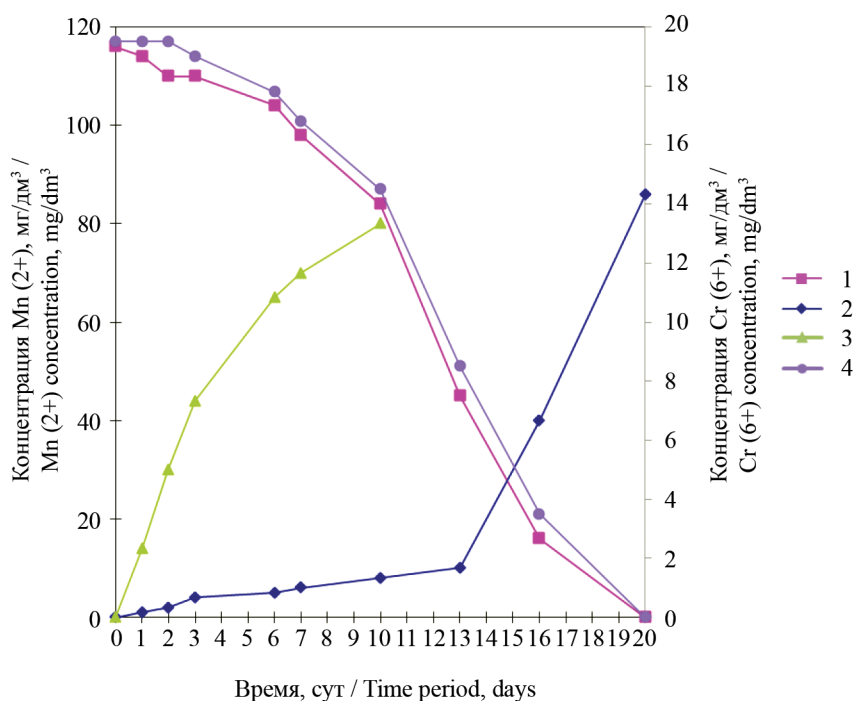


Рис. 7. Последовательность изменения концентрации Cr(6+) (1 и 4) и Mn(4+) (2, 3) в процессе хромат и Mn(4+)-редукции культурой *P. stutzeri P-19* при совместном их присутствии (1, 2) и отдельно (3, 4) в среде биоблока

Fig. 7. The sequence of changes in the concentration of Cr(6+) (1 and 4) and Mn(4+) (2, 3) in the process of chromate and Mn(4+) reduction using the *P. stutzeri P-19* culture in case of their co-presence (1, 2) and in case of their presence in isolation from one another (3, 4) in the medium.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переход в технологии биологической очистки на рельсы энергоэффективности и экономии средств при эксплуатации невозможен без снижения количества используемого кислорода и, как следствие, перехода на аноксидные/анаэробные условия очистки, широкое использование терминальных акцепторов электронов вместо традиционного кислорода. В связи с этим, как возможные терминальные акцепторы электронов при анаэробном дыхании бактерий, могут выступать Cr(6+) и Mn(4). Однако даже в незначительной концентрации эти металлы являются токсичными для активного ила традиционных биологических очистных сооружений, тогда как чистые культуры бактерий некоторых таксономических групп способны восстанавливать эти соединения, используя их как акцепторы электронов при дыхании.

Проведенные опыты подтвердили, что исследованные виды бактерий *Acinetobacter calcoaceticus* Ac-1, *Pseudomonas* — *P. aeruginosa* P-1, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. Mendocina* P-13, *P. stutzeri* P-19, традиционно относимые к облигатным аэробам, способны к анаэробному дыханию. Установлено, что возможно использование Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции культурами микроорганизмов различных таксонометрических групп в анаэробных условиях культивирования, и установлена последовательность их редукции: денитрифицирующие бактерии используют MnO₂ как терминальный акцептор электронов значительно эффективнее, чем Cr(6+). Микробная хроматредукция предшествует Mn(4+)-восстановлению. В процессе прохождения процессов Cr(6+)- и Mn(4+)-редукции токсичность загрязнителей снижается, образуются менее опасные Cr(4+) и Mn(2+). Использовать результаты опытов возможно при ретехнологизации очистных сооружений различных промышленных производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пупырев Е.И. Энергоэффективность очистных сооружений // Сантехника. 2015. № 1. С. 17–21.
2. Баженов В.И., Березин С.Е., Самбурский Г.А. Методика расчета стоимости жизненного цикла для оборудования, систем и сооружений водоснабжения и водоотведения // НДТ. 2017. № 4. С. 21–28.
3. Эпов А.Н., Канунникова М.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов — основа для технологического нормирования. ООО «Домкомстрой». URL: <http://treatmentwater.ru/data/documents/ANALIZ-DANNYH-RABOTY-OCHISTNYH-SOORUZHENIY-ROSSIYSKIH-GORODOV.pdf>
4. Данилович Д.А., Эпов А.Н., Канунникова М.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов — основа для технологического нормирования // НДТ. 2015. № 3–4. С. 19–28.
5. Павлинова И.И., Алексеев Л.С., Неверова М.А. Совершенствование методов биотехнологии в строительстве и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения. М. : МГСУ, 2014. 152 с.
6. Цветкова Л.И., Иваненко И.И., Новикова А.М. Восстановление Cr(6+) культурой *Pseudomonas mendocina* в лабораторном биореакторе // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 1 (73). С. 83–90. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.1.83-90
7. Иваненко И.И., Новикова А.М. Биологическое восстановление Cr(+6) аэробными микроорганизмами разных таксономических групп // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 175–183. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-2-175-183
8. Хасенова Э.Ж., Махатова А.С., Молдагулова Н.Б. Оптимизация условий культивирования штаммов микроорганизмов для биологической очистки сточных вод // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 10. С. 44–45.
9. Dmitrenko G.N., Kononova V.V., Ershko T.V. The successive reduction of Cr(VI) and NO₃ — or Mn(IV) ions present in the cultivation medium of denitrifying bacteria // Microbiology. 2006. Vol. 75. Issue 2. Pp. 125–128. DOI: 10.1134/s0026261706020032
10. Возня Н.Ф. Химия воды и микробиология. М. : Высшая школа, 1979. 340 с.
11. Баженов В.И., Эпов А.Н., Кичигина С.Е. Стабилизация илового индекса путем видовой селекции активного ила // Вода: экология и технология: Международный конгресс Экватек. 2008. С. 232–237.
12. Баженов В.И., Кичигина С.Е. Прогноз функционирования сооружений аэробной биологической очистки // Экология и промышленность России. 2007. № 10. С. 28–31.
13. Пименов Н.В., Захарова Е.Е., Брюханов А.Л., Корнеева В.А., Кузнецов Б.Б., Турова Т.П. и др. Активность и структура сообщества сульфатредуцирующих бактерий в осадках южной котловины оз. Байкал // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 180–190. DOI: 10.7868/S0026365614020177
14. Гвоздяк П.И. Имобилизованные микроорганизмы в очистке сточных вод от ксенобиотиков // Имобилизованные клетки в биотехнологии: сб. науч. тр. Киев, 2017. С. 56–62.
15. Френк Т., Коста М., Эйхенбергер И. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / пер. с англ. М. : Мир, 1993. 366 с.

16. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2. Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. С. 504–515.
17. Боброва М.В., Глоба Л.И. Влияние природы носителя на эффективность очистки природной воды // Химия и технология воды. 1995. Т. 17. № 4. С. 438–443.
18. Могилевич Н.Ф., Гвоздяк П.И., Цинберг М.Б., Романова Е.Н. Активность свободных и иммобилизованных клеток *Azotobacter vinelandii* — деструктора этиленгликоля // Микробиология. 1992. Т. 61. № 3. С. 431–437.
19. Гвоздяк П.И., Могилевич Н.Ф., Любченко О.А. Очистка сточных вод от неорганических соединений азота иммобилизованными микроорганизмами // Микробиологический журнал. 1994. Т. 56. № 4. С. 54–55.
20. Любченко О.А., Могилевич Н.Ф. Влияние носителя на активность нитрификации в очистке воды // Химия и технология воды. 2006. № 3. С. 36–41.
21. Niftrik L.A., Fuerst J.A., Damsté J.S.S., Kuenen J.G., Jetten M.S.M., Strous M. The anammoxosome: an intracytoplasmic compartment in anammox bacteria // FEMS Microbiology Letters. 2004. Vol. 233. Issue 1. Pp. 7–13. DOI: 10.1016/j.femsle.2004.01.044
22. Айрапетян Т.С., Карагяур А.С. Теоретические исследования биологической очистки в комбинированных аэротенках с прикрепленным биоценозом // Науковий вісник будівництва. 2018. Т. 91. № 1. С. 200–204. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-200-205
23. Добрынина Л.Ф., Цинберг М.Е. и др. Изучение пространственной сукцессии микроорганизмов в установке микробной очистки загрязненных сточных вод // Химия и технология воды. 1993. Т. 15. № 1. С. 71–73.
24. Романенко В.И., Кореньков В.Н. Чистая культура бактерий, использующих хроматы и бихроматы в качестве акцептора водорода при развитии в анаэробных условиях // Микробиология. 1977. Т. 46. № 3. С. 414–417.
25. Квасников Е.И., Ключникова Т.М., Касаткина Т.П. Бактерии, восстанавливающие тяжелые металлы в природе // Микробиология. 1988. Т. 57. № 4. С. 680–685.
26. Квасников Е.И., Ключникова Т.М., Касаткина Т.П. Резистентность бактерий к соединениям тяжелых металлов // Микробиологический журнал. 1988. Т. 50. № 6. С. 24–27.
27. Chirwa E.N. Simultaneous chromium(VI) reduction and phenol degradation in an anaerobic consortium of bacteria // Water Research. 2000. Vol. 34. Issue 8. Pp. 2376–2384. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00363-2
28. Chirwa E.N., Wang Y.T. Simultaneous chromium(VI) reduction and phenol degradation in a fixed-film coculture bioreactor: reactor performance // Water Research. 2001. Vol. 35. Issue 8. Pp. 1921–1932. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00472-3
29. Каравайко Г.И., Юрченко В.А., Ремизов В.И., Ключникова Т.М. Восстановление MnO_2 бесклеточными экстрактами *Acinetobacter calcoaceticus* // Микробиология. 1986. Т. 55. № 5. С. 105–114.
30. Цветкова Л.И., Иваненко И.И., Новикова А.М. Изучение использования $Mn(4+)$ как терминального акцептора электронов для нитратредуктирующих аэробных микроорганизмов // Биотехнология в интересах экологии и экономики Сибири и Дальнего Востока : мат. V Всеросс. науч.-практ. конф., 25–27 июня 2018 г. Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 85–90.
31. Вудворд Дж. Иммобилизованные клетки и ферменты. М. : Мир, 1988. 250 с.
32. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М. : Наука, 1989. 288 с.
33. Убайдуллаева А.К. Роль гетеротрофных бактерий в восстановлении элементов с переменной валентностью : автореф. кан. биол. наук. Алматы : НАН Казахстан, Институт микробиологии и вирусологии, 1993. 19 с.
34. Мольков Д.В. Накопление и потребление внутриклеточных запасных веществ *Acinetobacter calcoaceticus* и *Escherichia coli* : дисс. кан. биол. наук. Пермь, 2001. 126 с.
35. Ashkenazi H., Nitzan Y. Photoinactivation of *Acinetobacter baumannii* by photosensitizers // Proc. 5th Int. Symp. on the Biology of *Acinetobacter*. Netherlands, 2000. P. 41.

Поступила в редакцию 12 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Ивановна Иваненко** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры водопользования и экологии; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; i5657@mail.ru;

Антонина Михайловна Новикова — старший лаборант кафедры водопользования и экологии; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

REFERENCES

1. Pupyrev E. I. Energy efficiency of treatment facilities. *Plumbing*. 2015; 1:17-21. (rus.).
2. Bazhenov V.I., Berezin S.E., Sambursky G.A. Method of calculation of life cycle cost for equipment, systems and structures of water supply and water disposal. *BAT*. 2017; 4:21-28. (rus.).
3. Epov A.N., Kanunnikov M.A. *Analysis of Data of Work of Treatment Facilities of Russian Cities — Basis for Technological Rationing*. “LLC” Domkopstroï. URL: <http://treatmentwater.ru/data/documents/ANALIZ-DANNYH-RABOTY-ochISTNYH-SOORU-ZhENIY-ROSSIYSKIH-GORODOV.pdf> (rus.).
4. Danilovich D.A., Epov A.N., Kanunnikov M.A. Analysis of data of work of treatment facilities of Russian cities — the basis for technological rationing. *BAT*. 2015; 3-4:19-28. (rus.).
5. Pavlinova I.I., Alekseyev L.C., Neverova M.A. *Improvement of biotechnology methods in the construction and operation of water supply and sanitation systems*. Moscow, MGSU, 2014; 152. (rus.).
6. Tsvetkova L.I., Ivanenko I.I., Novikova A.M. Restoration Sr (6) culture *Pseudomonas mendocina* in laboratory bioreactor. *Water and Ecology: Problems and Solves*. 2018; 1(73):83-90. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.1.83-90 (rus.).
7. Ivanenko I.I., Novikova A.M. CR(6+) biological recovery with aerobic microorganisms of different taxonomic groups. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 2(67):175-183. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-2-175-183 (rus.).
8. Hasenova E.J., Mahatov A.S., Moldagulova N.B. Optimization of conditions of cultivation of strains of microorganisms for biological treatment of waste water. *Current Problems of Humanities and Natural Sciences*. 2015; 10:44-45. (rus.).
9. Dmitrenko G.N., Konovalova V.V., Ereshko T.V. The successive reduction of Cr(VI) and NO₃ — or Mn(IV) ions present in the cultivation medium of denitrifying bacteria. *Microbiology*. 2006; 75(2):125-128. DOI: 10.1134/s0026261706020032
10. Vovodaya N.F. *Chemistry of Water and Microbiology*. Moscow, Higher School, 1979; 340. (rus.).
11. Bazhenov V.I., Epov A.N., Kichigina S.E. Stabilization of sludge index by species selection of active sludge. *Water: Ecology and Technology: International Congress Ekvatek*. 2008; 232-237. (rus.).
12. Bazhenov V.I., Kichigina S.E. Forecast of operation of aerobic biological purification facilities. *Ecology and industry of Russia*. 2007; 10:28-31. (rus.).
13. Pimenov N.V., Zakharova E.E., Brukhanov A.L., Korneeva V.A., Kuznetsov B.B., Turov T.P. et al. Activity and structure of the community of sulfate-reducing bacteria in the sediments of the southern of Lake Baikal. *Microbiology*. 2012; 83(2):180-190. DOI: 10.7868/S0026365614020177 (rus.).
14. Nail P.I. Immobilized microorganisms in the treatment of waste water from xenobiotics. *Immobilized Cells in Biotechnology: Scientific works*. Kiev, 2017; 56-62. (rus.).
15. Frank T., Costa M., Eichenberger I. *Some issues of metal ion toxicity*. Moscow, World, 1993; 366. (rus.).
16. Timonin A.S. *Engineering and Environmental Directory*. Vol. 2. Kaluga, N. Bockareva, 2003; 504-515. (rus.).
17. Bobrov M.V., Globe L.I. Influence of the nature of the carrier on the efficiency of natural water purification. *Chemistry and Water Technology*. 1995; 17(4):438-443. (rus.).
18. Mogilevich N.F., Kolozhyak P.I., Tsinberg M.B., Romanova E.H. Activity of free and immobilized *Azotobacter vinelandii* cells — ethylene glycol destructor. *Microbiology*. 1992; 61(3):431-437. (rus.).
19. Koloviyak P. I., Mogilevich N.F., Lubchenko O.A. Treatment of waste water from inorganic nitrogen compounds by immobilized microorganisms. *Microbiological Journal*. 1994; 56(4):54-55. (rus.).
20. Lubchenko O.A., Mogilevich N.F. Influence of the carrier on nitrification activity in water purification. *Chemistry and Water Technology*. 2006; 3:36-41. (rus.).
21. Niftrik L.A., Fuerst J.A., Damsté J.S.S., Kuenen J.G., Jetten M.S.M., Strous M. The anammoxosome: an intracytoplasmic compartment in anammox bacteria. *FEMS Microbiology Letters*. 2004; 233(1):7-13. DOI: 10.1016/j.femsle.2004.01.044
22. Ayrapetyan T.S., Karagyaur A.S. Theoretical research of biological purification in combined aerotencics with attached biocenosis. *Naukovyi vnik budnitva*. 2018; 91(1):200-204. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-200-205 (rus.).
23. Dobrinina L.F., Tsinberg M.E. et al. Study of spatial succession of microorganisms in the microbial treatment plant of contaminated waste water. *Chemistry and Water Technology*. 1993; (1):71-73. (rus.).
24. Romanenko V.I., Korenkov V.N. A pure culture of bacterial cells assimilating chromates and bichromates as hydrogen acceptors when grown under anaerobic conditions. *Microbiology*. 1977; 46(3):414-417. (rus.).
25. Kwasnikov E.I., Klusnikov T.M., Kasatkin T.J. Bacteria reducing heavy metals in nature. *Microbiology*. 1988; 57(4):680-685. (rus.).
26. Kwasnikov E.I., Klusnikov T.M., Kasatkin T.K. Resistance of bacteria to heavy metal compounds. *Microbiological Journal*. 1988; 50(6):24-27. (rus.).
27. Chirwa E.N. Simultaneous chromium(VI) reduction and phenol degradation in an anaerobic consortium of bacteria. *Water Research*. 2000; 34(8):2376-2384. DOI: 10.1016/s0043-1354(99)00363-2

28. Chirwa E.N., Wang Y.T. Simultaneous chromium(VI) reduction and phenol degradation in a fixed-film coculture bioreactor: reactor performance. *Water Research*. 2001; 35(8):1921-1932. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00472-3
29. Karavayko G.I., Yurchenko V.A., Remizov V.I., Klusnikov T.M. Restoration MnO_2 cell-free extracts *Acinetobacter calcoaceticus*. *Microbiology*. 1986; 55(5):105-114. (rus.).
30. Tsvetkova L.I., Ivanenko I.I., Novikova A.M. Study of the use of Mn (4) as a terminal electron acceptor for nitrate reducing aerobic microorganisms. *Biotechnology for Ecology and Economy of Siberia and the Far East: materials V of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2018; 85-90. (rus.).
31. Woodward J. *Immobilized cells and enzymes*. Moscow, World, 1988; 250. (rus.).
32. Kuznetsov S.I., Dubinin G.A. *Methods of studying aquatic microorganisms*. Moscow, Science, 1989; 288. (rus.).
33. Ubaidullayeva A.K. *The role of heterotrophic bacteria in the restoration of elements with variable valence : abstract of the candidate of biological Sciences*. Almaty, National Academy of Sciences, Institute of Microbiology and Virology, 1993; 19. (rus.).
34. Molkov D.V. *Accumulation and consumption of intracellular spare substances Acinetobacter calcoaceticus and Escherichia coli : abstract of the candidate of biological Sciences*. Perm, 2001; 126. (rus.).
35. Ashkenazi H., Nitzan Y. Photoinactivation of *Acinetobacter baumannii* by photosensitizers. *Proc. 5th Int. Symp. on the Biology of Acinetobacter*. Netherlands, 2000; 41.

Received April 12, 2020.

Adopted in a revised form on May 6, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Irina I. Ivanenko** — Candidate of Technical Science, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Water use and ecology; **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; i5657@mail.ru;

Antonina M. Novikova — senior assistant; **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation.

Скоростной режим винтовых течений в створе косонаправленных донных циркуляционных порогов

А.В. Кловский¹, Д.В. Козлов²

¹ *Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен механизм формирования винтовых течений (ВТ) вдоль верховой и низовой граней косонаправленных донных циркуляционных порогов (КДЦП), которые наряду с искусственной поперечной циркуляцией (ИПЦ) защищают водоприемник от захвата русловых наносов при водозаборе. Интенсивность и направление ВТ и ИПЦ зависят от режима водотока, плановых и геометрических характеристик донной преграды. Имеющиеся рекомендации по назначению рациональных характеристик КДЦП с точки зрения устойчивого формирования в потоке всех трех защитных течений для условий бесплотинного водозабора из рек носят противоречивый характер и требуют уточнения. Цель исследования — изучение скоростного режима ВТ в створе КДЦП при различных плановых, геометрических характеристиках преграды и экспериментальных гидравлических режимах ее работы на физической модели с неразрываемым руслом (без водоотделения), а также определение эффективного диапазона углов установки КДЦП к борту лотка с точки зрения образования устойчивых и интенсивных ВТ вдоль верховой и низовой граней порога.

Материалы и методы. Используются физические модельные гидравлические исследования, теоретические расчеты. Изучены пять гидравлических режимов работы КДЦП с различными плановыми и геометрическими характеристиками на физической модели с неразрываемым руслом (без водоотделения). Проведено обобщение и анализ полученных экспериментальных данных.

Результаты. Представлены результаты лабораторных гидравлических исследований скоростного режима ВТ в створе КДЦП. Разработаны экспериментальные графические зависимости, характеризующие интенсивность и направление ВТ вдоль верховой и низовой граней порога.

Выводы. Установлено определяющее влияние угла установки преграды к борту лотка (береговой линии) на интенсивность и направление ВТ в створе КДЦП. Экспериментально определен эффективный диапазон углов установки КДЦП с точки зрения формирования устойчивых и интенсивных ВТ вдоль верховой и низовой граней порога с нужным для практики направлением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водозабор, русловые наносы, искусственная поперечная циркуляция, косонаправленный донный циркуляционный порог, защитные винтовые течения, скоростной режим потока

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кловский А.В., Козлов Д.В. Скоростной режим винтовых течений в створе косонаправленных донных циркуляционных порогов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 859–866. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.859-866

Velocity rate of screw streams in the site of submerged vanes

Alexey V. Klovsky¹, Dmitry V. Kozlov²

¹ *Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev); Moscow, Russian Federation;*

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

ABSTRACT

Introduction. The formation mechanism of longitudinal screw streams (LSS) along the upstream and downstream face of submerged vanes (SV) is considered. Acting along with the artificial transversal circulation (ATC), these streams protect the water intake from the channel sediments. The intensities and directions of LSS and ATC depend on the regime of flow, the planned-geometric characteristics of the vanes. Recommendations concerning the purpose of SV's rational characteristics in the aspect of steady formation of all three protective streams in the flow for river damless intakes are contradictory and require clarification. The purpose of the study is to analyze the velocity rate of the LSS in SV site at various planned-geometric characteristics of the vane and hydraulic modes of its operation based on a physical model with an erosion-resistant channel (without water separation), as well as to determine an efficient range of setting angles of the SV's to the tray board in terms of formation of steady and intensive LSS along the upstream and downstream face of the vane.

Materials and methods. Model physical hydraulic studies and theoretical calculations were used. Five hydraulic modes of SV's operation were studied, with various planned-geometric characteristics, using the physical model with an erosion-resistant channel (without water separation). The obtained experimental data were summarized and analyzed.

Results. Results of laboratory hydraulic studies of LSS velocity rate in LSS site were presented. Experimental graphic dependence diagrams were plotted characterizing the intensity and direction of the LSS along upstream and downstream faces of the vane.

Conclusions. A determining influence of the setting angle of the vane to the tray board (bank line) on the intensity and direction of the LSS in SV's site was found out. Experimentally, an efficient SV setting angle was determined in terms of the formation of steady and intensive LSS along the upstream and the downstream vane face with practically usable direction.

KEYWORDS: water intake, channel sediments, artificial transversal circulation, submerged vanes, protective corkscrew flows, flow velocity regime

FOR CITATION: Klovsky A.V., Kozlov D.V. Velocity rate of screw streams in the site of submerged vanes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):859-866. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.859-866 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее сложных проблем при обеспечении гарантированной подачи в гидромелиоративные и гидроэнергетические системы речной воды требуемого качества является борьба с захватом водоприемными отверстиями водозаборных гидроузлов русловых наносов, в первую очередь — донных [1–5]. Для решения указанной проблемы на стадии проектирования, в процессе эксплуатации или при реконструкции в состав компоновочных схем водозаборных гидроузлов включаются различные наносозащитные системы или их отдельные элементы. Накопленный опыт эксплуатации низконапорных водозаборных гидроузлов на реках горно-предгорной зоны, транспортирующих большое количество наносов, показал эффективность применения наносозащитных систем и элементов, работа которых основана на перераспределении удельных расходов по ширине подводящего русла вследствие искусственной поперечной циркуляции (ИПЦ), возбуждающейся в водном потоке [6, 7].

В отечественной гидротехнической науке теоретические основы данного метода возбуждения ИПЦ в открытом русле заложены Р.Ж. Жулаевым, который на основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований показал, что любое смещение динамической оси потока, в том числе за счет перераспределения удельных расходов по ширине подводящего русла, ведет к его расслоению, а значит, и возникновению в нем поперечного перемещения водных масс (поперечной циркуляции потока) [8].

Анализ публикаций показал, что косонаправленный донный циркуляционный порог (КДЦП) — один из наиболее эффективных и простых как в конструктивном, так и в эксплуатационном отношении наносозащитных элементов [9, 10]. В работах зарубежных исследователей такой порог называют затопленной лопастью (лопаткой) [11–17]. Затопленная преграда, расположенная под некоторым углом β к береговой линии, за счет эффективного перераспределения удельных расходов воды по ширине подводящего русла возбуждает в потоке искусственную

поперечную циркуляцию. В зоне защищаемого водозаборного сооружения вслед за эпюрой удельных расходов трансформируется и эпюра донных наносов. Наряду с ИПЦ противонамосную функцию выполняют также винтовые течения (ВТ) в створе порога, формируемые последним как обтекаемой потоком затопленной преградой. Г.В. Соболиным отмечалось [9, 10], что при взаимодействии КДЦП с потоком вдоль верховой грани порога формируется винт, размеры которого соответствуют высоте порога в данном сечении. Наблюдаемое явление объяснялось расслоением потока при его переливе через гребень донного порога, экранированием порогом набегающих масс жидкости и внутренним трением воды. В свою очередь, ВТ вдоль низовой грани порога образуются за счет сложения скорости поперечной циркуляции, возникающей за порогом, и продольной скорости, обуславливаемой плановым расположением преграды по отношению к движущемуся потоку. В случае устойчивого и интенсивного развития ВТ вдоль верховой и низовой граней КДЦП, при преимущественном их направлении от основания (корня) порога у берега к концу преграды, способствуют промыву подходящих к сооружению и преодолевших преграду наносов, соответственно, в основное русло.

Г.В. Соболиным [10] и В.С. Бондаренко [18] установлено, что на интенсивность и направление всех трех защитных течений в той или иной степени влияет угол установки порога β к береговой линии, относительная высота порога $P' = P/H_0$, где P — средняя высота порога; H_0 — глубина воды бытового русла; уклон верхней грани порога i от его основания у берега к концу преграды; а также величина стеснения потока $n = b_d/B = l \cdot \sin \beta / B$, где l — геометрическая длина порога; и средняя скорость потока V_0 на подходе к водозабору.

В соответствии с рекомендациями Г.В. Соболина и И.К. Рудакова [10], донный циркуляционный порог следует выполнять прямолинейным, косопоставленным к потоку с углом $\beta = 15\text{--}30^\circ$, длиной $2B$, стесняющим русло на 60–80 % ($n = 0,6\text{--}0,8$) с продольным уклоном верхней грани порога $i = 0,005\text{--}0,20$ от бытового дна русла. Отметим,

что указанные рекомендации справедливы в большей степени для работы порога в составе плотинных водозаборных гидроузлов в условиях высоких коэффициентов водозабора ($\alpha \geq 0,7$). Для условий работы бесплотинных водозаборных гидроузлов при небольших значениях коэффициента водозабора α устройство донных порогов рекомендуемой конструкции не всегда оправдано, что отмечалось Г.В. Соболиным [9, 10].

По данным В.С. Бондаренко, в условиях бесплотинного водозабора при $\alpha \leq 0,2$ угол установки порога β целесообразно увеличивать до $40...50^\circ$, при этом величину стеснения русла n следует определять для конкретных условий водозабора с использованием рекомендаций А.С. Образовского [18].

С учетом имеющихся противоречий в рекомендациях по назначению планово-геометрических характеристик КДЦП для условий бесплотинного водоотделения было принято решение о необходимости проведения серии лабораторных гидравлических исследований условий работы затопленных преград рассматриваемой конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — КДЦП, работающие в условиях недеформированного отводом потока. Предмет экспериментального исследования — скоростной режим ВТ в створе КДЦП для различных плановых, геометрических характеристик донной преграды и гидравлических режимов ее работы.

Цели экспериментального исследования:

- изучение скоростного режима ВТ в створе КДЦП на физической модели с неразмываемым руслом (без водоотделения) в широком диапазоне изменения граничных условий работы преграды: относительной высоты порога P' ; величины стеснения русла n ; уклона верхней грани порога i ; а также относительной величины средней скорости потока V' ($V' = V_{0,i}/V_{0,max}$, где $V_{0,i}$ — средняя скорость потока для соответствующего экспериментального режима; $V_{0,max}$ — максимальное значение средней скорости потока в условиях эксперимента); угла установки порога β к борту лотка;

- определение эффективного диапазона углов установки КДЦП к борту лотка с точки зрения формирования устойчивых и интенсивных ВТ вдоль верховой и низовой граней порога.

Для достижения намеченных целей решены следующие задачи:

- уточнена методика проведения лабораторных гидравлических исследований скоростного режима ВТ в створе КДЦП на физической модели с неразмываемым руслом (без водоотделения);
- запроектирована и построена экспериментальная установка, проведены лабораторные гидравлические исследования в широком диапазоне изменения граничных условий работы донных преград;
- получены экспериментальные данные, обобщение и анализ которых позволили оценить скоростной режим ВТ в створе КДЦП различных конструктивных типов и сформулировать основные выводы.

Исследования выполнены на экспериментальной установке (рис. 1) в лаборатории гидравлики водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева.

Учитывая необходимость сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными других авторов, а также возможности экспериментальной установки и имеющиеся сведения об эффективном диапазоне относительной высоты донных циркуляционных порогов ($P' = 0,25...0,5$) [10, 18], были исследованы 5 режимов работы каждого типа донной преграды (табл. 1).

Донные циркуляционные пороги изготавливались из органического стекла с высокой степенью точности, их планово-геометрические характеристики определялись с учетом намеченного объема исследований. На модели изучались гидравлические условия работы КДЦП, расположенных под углами $\beta = 15...75^\circ$ к борту лотка (шаг приращения β равен 15°). Величина стеснения потока $n = 0,2...0,8$ (шаг приращения n равен $0,15$); с учетом возможностей лабораторной установки при $\beta = 15^\circ$ $n = 0,2; 0,35$. Уклон верхней грани порога i в условиях эксперимента изменялся от $0,0125$ ($n = 0,8; \beta = 30^\circ$) до $0,0966$ ($n = 0,2; \beta = 75^\circ$). Средняя высота донной

Табл. 1. Экспериментальные гидравлические режимы работы порога

Table 1. Experimental hydraulic vane operation modes

Экспериментальный режим / Experimental mode	P , м / m	H_0 , м / m	$P' = P/H_0$	V_0 , м/с / m/s	$V' = V_0/V_{0,max}$	Q , м ³ /с · 10 ⁻³ / м ³ /с · 10 ⁻³
1	0,06 ($P_1 = 0,07$, $P_2 = 0,05$)	0,12	0,5	0,25	0,833	30
2		0,15	0,4	0,20	0,667	30
3		0,15	0,4	0,25	0,833	37,5
4		0,15	0,4	0,30 ($V_{0,max}$)	1	45
5		0,15	0,3	0,25	0,833	50

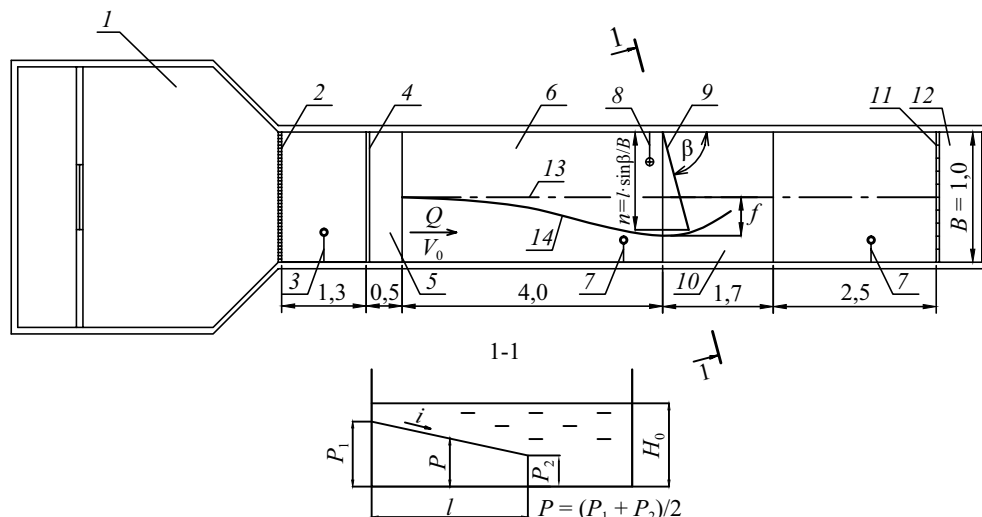


Рис. 1. Схематический план экспериментальной установки: 1 — водоприемный бак; 2 — успокоительная решетка; 3 — шпигенмасштаб; 4 — мерный водослив; 5 — успокоительная конструкция; 6 — гидравлический лоток; 7 — подвижные шпигенмасштабы; 8 — микровертушка; 9 — косонаправленный донный циркуляционный порог; 10 — область установки донных порогов; 11 — жалюзийный затвор; 12 — сбросной колодец; 13 — динамическая ось потока до возбуждения ИПЦ; 14 — динамическая ось потока после возбуждения ИПЦ (размеры в метрах)

Fig. 1. Schematic view of the experimental installation: 1 — drain tank; 2 — diffusion grid; 3 — transversal scale; 4 — measuring spillway; 5 — diffusion device; 6 — hydraulic flume; 7 — moving transversal scale; 8 — miniflowmeter; 9 — submerged vane; 10 — vane installation area; 11 — louvre damper; 12 — downshaft; 13 — dynamic axis of the flow before generation of the ATC; 14 — dynamic axis of the flow after generation of the ATC (in meters)

преграды P равнялась 6 см, относительная высота порогов P' принимала значения 0,3; 0,4; 0,5.

Исследования скоростного режима ВТ в створе КДЦП проводились по методике В.С. Бондаренко [18]. На гидрометрических створах, расположенных на расстоянии 1 см от верховой и низовой граней порога, выделялись по 7 промерных вертикалей. Ось x направлена вдоль порога, началом координат являлась середина порога с продольной координатой (0), створы располагались с шагом $0,33 \times a$, где a — полудлина порога. Таким образом, корень преграды в каждом случае имел продольную координату $(-a)$, а концевая часть порога — $(+a)$. В намеченных вертикалях микровертушкой промерялись продольные скорости ВТ в середине высоты порога (центре винта) для каждого из пяти экспериментальных режимов. Ввиду характерных для ВТ пульсаций будем вести речь об усредненных величинах продольных скоростей.

За критерий оценки интенсивности формируемых ВТ в створе порога было принято соотношение продольных скоростей ВТ вдоль его верховой и низовой граней и средней скорости основного потока $V_{\text{винт.х}}/V_0$ для соответствующего экспериментального режима.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате обработки полученных данных выявлена следующая закономерность: интенсивность ВТ в створе КДЦП при постоянной величине n не зависит от гидравлического режима работы

преграды, что подтвердил выполненный двухфакторный дисперсионный анализ.

Для каждого из углов β незначительная разница в значениях $V_{\text{винт.х}}/V_0$ для ВТ вдоль верховой грани КДЦП отмечена на участке от $(-0,66 \cdot a)$ до $(0,33 \cdot a)$, преимущественно для наиболее коротких ($n = 0,2$) и наиболее длинных порогов ($n = 0,8$) при сохранении общей качественной картины кинематической структуры потока. Отмеченное справедливо и для ВТ вдоль низовой грани порогов при $\beta = 75^\circ$ и $\beta = 60^\circ$, $\beta = 45^\circ$ ($n = 0,2$), $\beta = 30^\circ$ ($n = 0,2$; 0,8), $\beta = 15^\circ$ ($n = 0,2$; 0,35). Последнее позволило для указанных случаев говорить об усредненных значениях продольных скоростей ВТ. Кинематическая структура потока за порогами с углом $\beta = 45^\circ$ при $n = 0,35 \dots 0,8$ значительно трансформируется при изменении гидравлического режима работы преграды для каждой величины стеснения потока n и не поддается сколько-нибудь достоверному прогнозированию. Для КДЦП при $\beta = 30^\circ$ ($n = 0,35$; 0,5; 0,65) разница в значениях $V_{\text{винт.х}}/V_0$ по всей длине преграды обусловила выделение трех групп экспериментальных режимов со схожим скоростным режимом ВТ вдоль низовой грани порога: режим № 1, режимы № 2–4 и режим № 5.

На рис. 2 приведены графические зависимости $V_{\text{винт.х}}/V_0 = f(x)$. Знак «—» на оси абсцисс соответствует створам, расположенным выше по течению относительно начала координат (середины порога), знак «+» — створам, расположенным ниже по течению относительно начала координат.

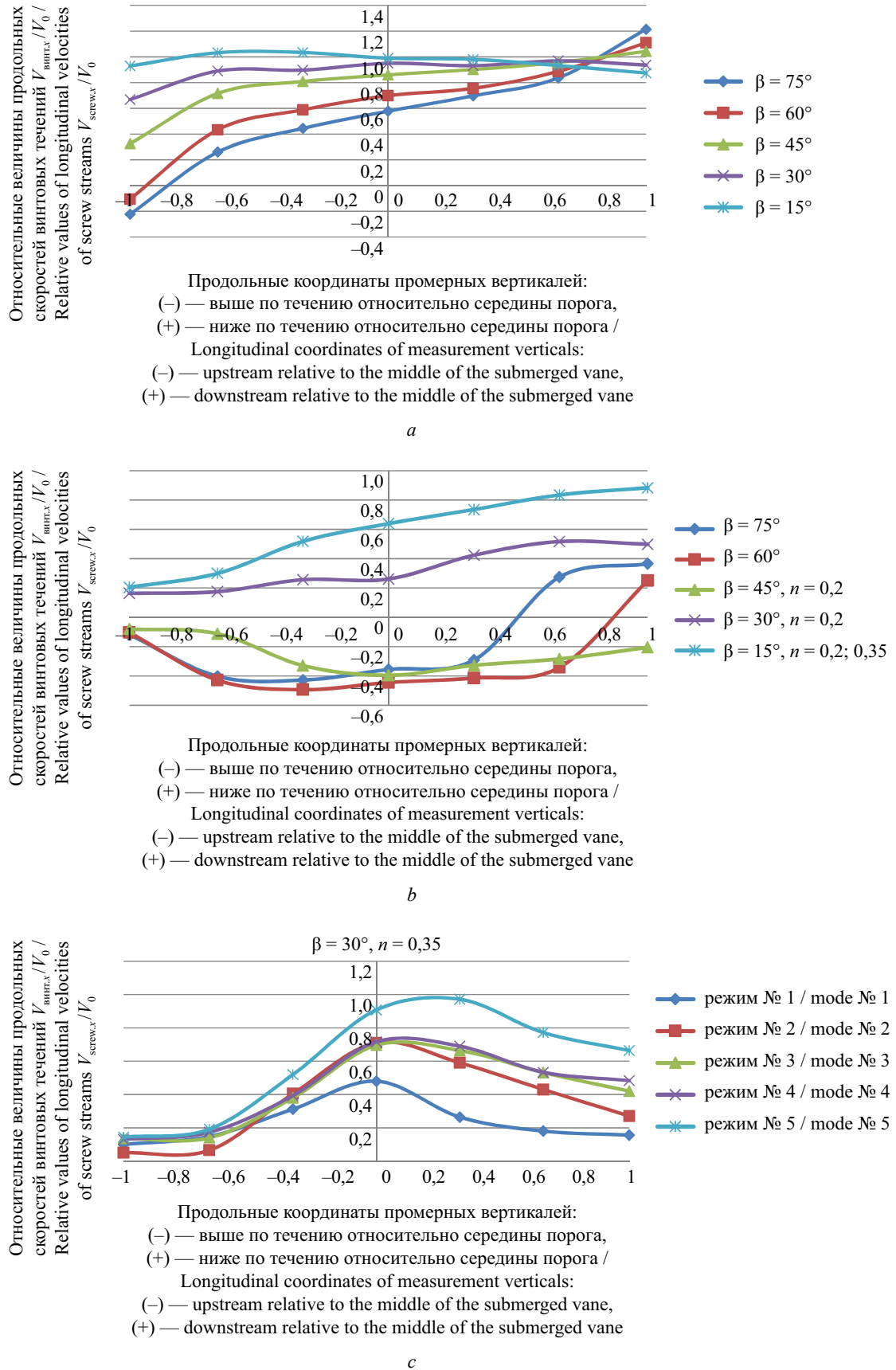


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $V_{\text{винт},x}/V_0 = f(x)$: *a* — ВТ вдоль верховой грани порога; *b* — ВТ вдоль низовой грани порога; *c* — ВТ вдоль низовой грани порога при $\beta = 30^\circ$, $n = 0,35$

Fig. 2. Experimental dependences $V_{\text{screw},x}/V_0 = f(x)$: *a* — LSS along the upstream face of the sill; *b* — CSF along the downstream face of the vane; *c* — LSS along the downstream face of the vane at $\beta = 30^\circ$, $n = 0.35$

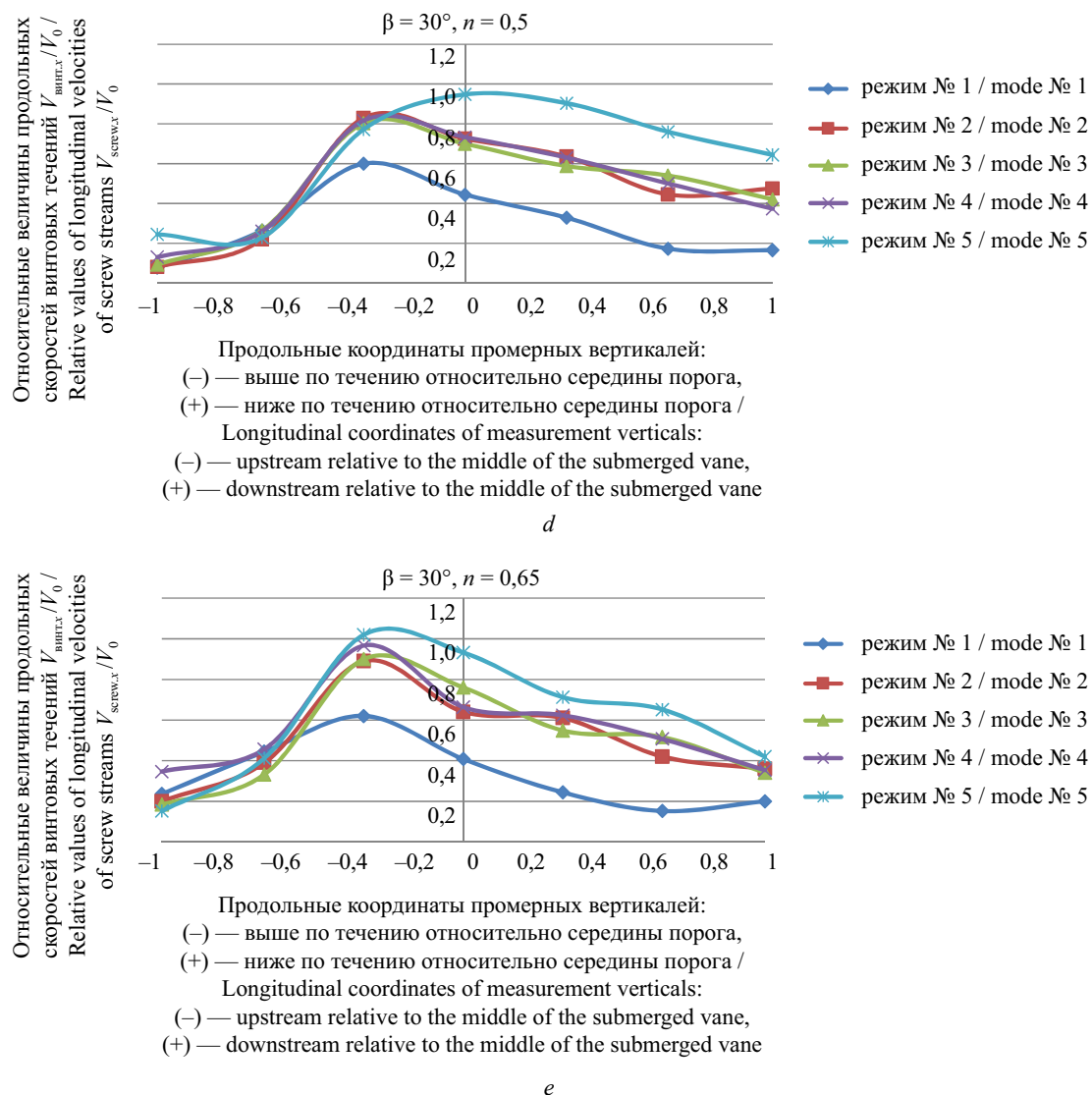


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $V_{\text{винт.х}}/V_0 = f(x)$: d — ВТ вдоль низовой грани порога при $\beta = 30^\circ, n = 0,5$; e — ВТ вдоль низовой грани порога при $\beta = 30^\circ, n = 0,65$

Fig. 2. Experimental dependences $V_{\text{сcrew.х}}/V_0 = f(x)$: d — LSS along the downstream face of the vane at $\beta = 30^\circ, n = 0,5$; e — LSS along the downstream face of the vane at $\beta = 30^\circ, n = 0,65$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определяющее влияние на интенсивность и направление ВТ в створе КДЦП оказывает угол установки порога β к борту лотка. Скоростной режим ВТ вдоль верховой грани порога практически не зависит от экспериментального режима работы преграды и величины стеснения русла n , что справедливо и для ВТ вдоль низовой грани порога при $\beta = 75^\circ$ и $\beta = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ ($n = 0,2$); $\beta = 30^\circ$ ($n = 0,2; 0,8$); $\beta = 15^\circ$ ($n = 0,2; 0,35$).

С уменьшением угла β от 75° до 15° усиливаются защитные функции ВТ вдоль верховой грани порога: растут абсолютные значения продольных скоростей, точка раздела течений смещается к корню преграды.

Наибольшее развитие ВТ получают при $\beta = 15^\circ$ и $\beta = 30^\circ$, а скорости по всей длине преграды на-

правлены к концевой части порога. Также отметим, что для углов $\beta = 45^\circ \dots 75^\circ$ ВТ за низовой гранью порога имеют преимущественное направление в сторону корня преграды, что в условиях реальной работы водозаборного сооружения должно снижать их защитные функции.

Таким образом, с точки зрения формирования в створе КДЦП устойчивых и интенсивных ВТ, направленных от корня порога у берега к концу преграды по всей ее длине, эффективным является диапазон углов установки порога $\beta = 15^\circ \dots 30^\circ$.

В качестве основных направлений дальнейших исследований можно определить разработку и изучение эффективных наносозащитных устройств в составе водозаборов на реках с резко переменными уровнями, а также изучение русловых процессов в верхнем и нижнем бьефах водозаборных гидроузлов, имеющих в своем составе КДЦП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филончиков А.В. Водозаборные гидроузлы. Фрунзе : Кыргызстан, 1990. 371 с.
2. Атаманова О.В., Фролова Г.П., Якиманский Ю.С., Биленко В.А., Логинов В.И., Рудаков И.К. и др. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной. Бишкек : ИД «Салам», 2009. 504 с.
3. Nakato T., Ogden F.L. Sediment Control at Water Intakes along Sand-Bed Rivers // Journal of Hydraulic Engineering. 1998. Vol. 124. Issue 6. Pp. 589–596. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:6(589)
4. Alomari N.K., Yusuf B., Ali T.A.M., Ghazali A.H., Mohammad T.A. Flow in a Branching Open Channel: A Review // Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews. 2016. Vol. 2. Issue 2. Pp. 40–56.
5. Youguo M., Suzhen Z. Sediment control for irrigation intakes // Journal of Hydrodynamics. Ser. B 1. 2001. Pp. 122–126.
6. Barkdoll B.D., Ettema R., Odgaard A.J. Sediment Control at Lateral Diversions: Limits and Enhancements to Vane Use // Journal of Hydraulic Engineering. 1999. Vol. 125. Issue 8. Pp. 862–870. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:8(862)
7. Кловский А.В., Козлов Д.В. Generation of artificial transverse circulation in an open channel flow by submerged vanes // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 9. С. 1158–1166. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1158-1166
8. Жулаев Р.Ж. Поперечная циркуляция в открытом русле, возбуждаемая перераспределением расхода // Известия АН КазССР. Сер. : Энергетическая. 1959. Вып. 2 (16). С. 15–29.
9. Соболин Г.В. Защита сооружений на реках и каналах от наносов. Фрунзе : Кыргызстан, 1968. 199 с.
10. Соболин Г.В. Борьба с наносами при водозаборе в каналы оросительных систем горно-предгорной зоны : дис. ... док. техн. наук. М. : МГМИ, 1987. 425 с.
11. Odgaard A.J., Spoljaric A. Sediment Control by Submerged Vanes // Journal of Hydraulic Engineering. 1986. Vol. 112. Issue 12. Pp. 1164–1180. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:12(1164)
12. Karami H., Farzin S., Sadrabadi M.T. Moazeni H. Simulation of flow pattern at rectangular lateral intake with different dike and submerged vane scenarios // Water Science and Engineering. 2017. Vol. 10. Issue 3. Pp. 246–255. DOI: 10.1016/j.wse.2017.10.001
13. Ouyang H.-T. Investigation on the Dimensions and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels // Journal of Hydraulic Engineering. 2009. Vol. 135. Issue 3. Pp. 209–217. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2009)135:3(209)
14. Ouyang H.-T., Lu. C. Optimizing the Spacing of Submerged Vanes across Rivers for Stream Bank Protection at Channel Bends // Journal of Hydraulic Engineering. 2016. Vol. 142. Issue 12. P. 04016062. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001210
15. Kalathil S.T., Wuppukondur A., Balakrishnan R.K., Chandra V. Control of Sediment Inflow into a Trapezoidal Intake Canal Using Submerged Vanes // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2018. Vol. 144. Issue 6. P. 04018020. DOI: 10.1061/(asce)www.1943-5460.0000474
16. Davoodi L., Bajestan M.S. Control of sediment entry to intake on a trapezoidal channel by submerged vane // Ecology, Environment and Conservation. 2012. Vol. 18. Issue 1. Pp. 165–169.
17. Beygipoor G., Bajestan M., Kaskuli H.A., Nazari S. The effects of submerged vane angle on sediment entry to an intake from a 90 degree converged bend // Advances in Environmental Biology. 2013. Vol. 7. Issue 9. Pp. 2283–2292.
18. Бондаренко В.С. Разработка и исследования бесплотинного водозабора для рек с тяжелыми гидрологическими и наносными режимами : дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 1975. 212 с.

Поступила в редакцию 15 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 апреля 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Алексей Викторович Кловский — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных конструкций; Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; SPIN-код: 9300-6402; alexey.klovskiy@yandex.ru;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; kozlovdv@mail.ru.

REFERENCES

1. Filonchikov A.V. *Water intake structures*. Frunze, Kyrgyzstan Publ., 1990; 371. (rus.).
2. Atamanova O.V., Frolova G.P., Yakimanskiy Yu.S., Bilenko V.A., Loginov V.I., Rudakov I.K. et al. *Hydrotechnical structures for small power generation in the mountain-foothill area*. Bishkek, Salam Publ., 2009; 504. (rus.).
3. Nakato T., Ogden F.L. Sediment Control at Water Intakes along Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998; 124(6):589-596. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:6(589)
4. Alomari N.K., Yusuf B., Ali T.A.M., Ghazali A.H., Mohammad T.A. Flow in a Branching Open Channel: A Review. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*. 2016; 2(2):40-56.
5. Youguo M., Suzhen Z. Sediment control for irrigation intakes. *Journal of Hydrodynamics. Ser. B I*. 2001; 122-126.
6. Barkdoll B.D., Ettema R., Odgaard A.J. Sediment Control at Lateral Diversions: Limits and Enhancements to Vane Use. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999; 125(8):862-870. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:8(862)
7. Klovsky A.V., Kozlov D.V. Generation of artificial transverse circulation in an open channel flow by submerged vanes. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14:9:1158-1166. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1158-1166 (rus.).
8. Zhulaev R.Zh. Transverse circulation in open channels induced by flow redistribution. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, a series of energy*. 1959; 2(16):15-29. (rus.).
9. Sobolin G.V. *Sediment protection of structures on rivers and canals*. Frunze, Kyrgyzstan Publ., 1968; 199. (rus.).
10. Sobolin G.V. *Sediment control during water intake into the irrigation canals of the mountain-foothill zone : thesis of doctor of technical sciences*. Moscow, MGMI, 1987; 425. (rus.).
11. Odgaard A.J., Spoljaric A. Sediment Control by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986; 112(12):1164-1180. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:12(1164)
12. Karami H., Farzin S., Sadrabadi M.T., Moazeni H. Simulation of flow pattern at rectangular lateral intake with different dike and submerged vane scenarios. *Water Science and Engineering*. 2017; 10(3):246-255. DOI: 10.1016/j.wse.2017.10.001
13. Ouyang H.-T. Investigation on the Dimensions and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2009; 135(3):209-217. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2009)135:3(209)
14. Ouyang H.-T., Lu. C. Optimizing the Spacing of Submerged Vanes across Rivers for Stream Bank Protection at Channel Bends. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2016; 142(12):04016062. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001210
15. Kalathil S.T., Wuppukondur A., Balakrishnan R.K., Chandra V. Control of Sediment Inflow into a Trapezoidal Intake Canal Using Submerged Vanes. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2018; 144(6):04018020. DOI: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000474
16. Davoodi L., Bajestan M.S. Control of sediment entry to intake on a trapezoidal channel by submerged vane. *Ecology, Environment and Conservation*. 2012; 18(1):165-169.
17. Beygipoor G., Bajestan M., Kaskuli H.A., Nazari S. The effects of submerged vane angle on sediment entry to an intake from a 90 degree converged bend. *Advances in Environmental Biology*. 2013; 7(9):2283-2292.
18. Bondarenko V.S. *Development and research of damless water intake for rivers with heavy sedimentary and hydrological regimes : thesis of candidate of technical sciences*. Novocherkassk, 1975; 184. (rus.).

Received March 15, 2020.

Adopted in a revised form on April 20, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: Alexey V. Klovsky — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Structures; Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K.A. Timiryazev); 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; SPIN-code: 9300-6402; alexey.klovskiy@yandex.ru;

Dmitry V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; kozlovdv@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 004.9:69

DOI:10.22227/1997-0935.2020.6.867-906

Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий

В.А. Волкодав, И.А. Волкодав

*Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость внедрения BIM-технологий в процессы управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов капитального строительства отмечена в поручении Президента Российской Федерации ПР-1235 от 19.07.2018 г. Определения информационной модели объекта капитального строительства и классификатора строительной информации (КСИ) законодательно закреплены в 2019 г. в Градостроительном кодексе РФ Федеральным законом от 27.06.2019 г. №151-ФЗ. Мировая практика свидетельствует о применении различных систем КСИ, критический анализ которых позволяет выделить основные требования к российскому КСИ, обосновать его структуру и состав.

Материалы и методы. Рассмотрены международные системы классификации строительной информации, нашедшие широкое практическое применение в области строительства: OmniClass (США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания) и CoClass (Швеция). Произведен анализ структур, состава, методологических основ рассмотренных классификационных систем. Проанализированы существующие российские классификаторы и международные классификационные системы в области строительства.

Результаты. Принимая во внимание анализ и обобщение мировой практики классификации строительной информации, разработана структура КСИ, адаптированная для задач применения технологий информационного моделирования объектов капитального строительства с учетом особенностей национальной базы нормативно-технической документации в строительстве. В качестве основы КСИ принята структура, рекомендуемая стандартом ISO 12006-2:2015. При разработке состава классификатора учтены требования по объединению и унификации существующих национальных классификаторов и опыт разработки и эксплуатации существующих в строительной отрасли классификационных систем. Предложена структура КСИ, состоящая из четырех базовых категорий и 21 базового класса.

Выводы. Классификатор строительной информации в предложенной структуре и составе обеспечивает формирование единого и универсального языка представления строительной информации в рамках единого информационного пространства строительной отрасли и единого стандартизированного формата представления содержания данных информационных моделей для задач управления ЖЦ объектов капитального строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификатор строительной информации, информационное моделирование, информационная модель объекта капитального строительства, структура классификатора строительной информации, состав классификатора строительной информации, классификационная система, управление жизненным циклом объекта капитального строительства, BIM

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906

Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies

Vladimir A. Volkodav, Ivan A. Volkodav

*Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction;
St. Petersburg, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Various building information classification systems are used internationally; their critical analysis makes it possible to highlight basic requirements applicable to the Russian classifier and substantiate its structure and composition.

Materials and methods. Modern international building information classification systems, such as OmniClass (USA), Uniclass 2015 (UK), CCS (Denmark), and CoClass (Sweden), are considered in the article. Their structure, composition, methodological fundamentals are analyzed. In addition to international classification systems, Russian construction information classifiers are analyzed.

Results. The structure of a building information classifier has been developed and tailored to the needs of BIM (building information modeling) and national regulatory and technical requirements. The classifier's structure complies with the one recommended by ISO 12006-2:2015. Its composition has regard to the requirements that apply to the aggregation and uni-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15, Выпуск 6, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 6, 2020

fication of Russian classifiers, and it also benefits from the classifiers developed for and used by the construction industry. The proposed building information classifier has four basic categories and 21 basic classes.

Conclusions. The proposed structure and composition of a building information classifier represent a unified and universal tool for communicating building information or presenting it in the standardized format in the consolidated information space designated for information models needed to manage life cycles of major construction projects.

KEYWORDS: building information classifier, information modeling, information model of a major construction project, structure of a building information classifier, composition of a building information classifier, classification system, life cycle management, BIM

FOR CITATION: Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):867-906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии, как область научных исследований и практической деятельности человека, в настоящее время — один из основных движущих факторов развития экономики и общества. Основная доля инновационных разработок и нововведений в области строительного проектирования за последние 20–30 лет связана с совершенствованием методов формирования, хранения и представления данных об объектах капитального строительства (ОКС), согласно концепции информационного моделирования зданий и сооружений (BIM) рассматриваемых как единый структурированный объект, получивший наименование «информационная модель» (ИМ) [1].

В России, наряду с зарубежными странами (такими как США, Великобритания, Дания, Германия, Финляндия и пр.), технологии информационного моделирования относятся к приоритетным направлениям инновационного развития строительной отрасли¹.

Реализация каждого инвестиционно-строительного проекта сопровождается большим количеством ассоциированных данных, генерируемых на протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ) объекта [2]. Процесс управления проектом (также, как и управление материальными активами) во многом является процессом управления данными проекта, что подразумевает хранение, извлечение, передачу и использование этих сведений всеми лицами, участвующими в реализации проекта. Возросшая роль ассоциированных проектных данных привела к тому, что они сами по себе стали активом, имеющим новую форму представления — цифровую.

Для полноценного взаимодействия всех участников процесса информационного обмена в строительной отрасли (изыскателей, проектировщиков, строителей, инвесторов и представителей эксплуатирующих организаций) необходим общий язык представления строительной информации, обеспе-

чить который должна единая система строительной классификации. Создание системы классификации строительной информации наряду с созданием общих терминологических основ BIM в России важно для формирования новых подходов к управлению ЖЦ ОКС [3]. Применение систем классификации делает возможным индексацию и структурирование всего массива данных инвестиционно-строительного проекта (ИСП), обеспечивая удобный доступ к ним и позволяя однозначно идентифицировать состав ИМ на каждом из этапов ЖЦ ОКС, что особенно важно в рамках процессов контроля реализации и управления рисками ИСП на различных этапах его ЖЦ [4].

Согласно работе [5], главной тенденцией развития инвестиционно-строительного процесса в условиях цифровой среды, формирующейся на технологической платформе BIM, является формирование механизмов углубленного сотрудничества участников ИСП на всех этапах ЖЦ объекта, что невозможно без использования единого и понятного языка передачи ассоциированной с проектом информации. Низкий уровень разработки правил классификации объектов, работ и ресурсов в строительстве и, как следствие, низкая совместимость форматов данных ограничивает использование BIM-технологий применительно к полному ЖЦ ОКС [6, 7].

Разработка национального классификатора строительной информации (КСИ) — первоочередной и базовый этап эффективного внедрения технологий информационного моделирования в строительстве на государственном уровне, обеспечивающий возможность государственного регулирования цифровых процессов в ходе реализации ИСП. Создание структуры КСИ и ее дальнейшее информационное наполнение — одни из основных мероприятий государственной стандартизации строительной отрасли².

Разработка и применение КСИ даст возможность формирования, распознавания и обработки кодов классификатора при помощи специализиро-

¹ Паспорт национального проекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: https://digital.ac.gov.ru/upload/iblock/219/NP_Cifrovaya_ekonomika.docx

² Профессиональное сообщество поддержало инициативу по созданию единой национальной системы классификации строительной информации. URL: <https://www.faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/news-35667/>

ванных программных решений. Реализация машиночитаемого КСИ обеспечит строительную отрасль универсальным средством представления и передачи данных между всеми участниками ИСП, способствуя повышению эффективности и экономичности существующих бизнес-процессов на всех этапах ЖЦ ОКС.

Создание и применение строительных классификаторов — один из первоочередных вопросов подготовки к применению BIM-технологий, но в настоящий момент в отечественной практике отсутствуют всеобъемлющие (комплексные) классификаторы строительной информации, имеются лишь отдельные классификаторы ресурсов, машин, продукции, классификатор работ существует только в сметных расценках и нормах времени [8].

Очевидна также необходимость гармонизации разрабатываемого классификатора строительной информации с лучшими практиками международных классификационных систем и существующих стандартов³.

В рамках разработки структуры и состава КСИ для создания и ведения информационных моделей ОКС Научно-инженерным центром цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС) исследована история возникновения и развития классификаторов строительной информации [9] и рассмотрены современные классификационные системы и международные стандарты. Мировая практика классификации строительной информации основана на применении ряда систем классификации, используемых в строительных отраслях различных стран мира. Наиболее эффективными являются следующие классификационные системы: OmniClass Construction Classification System (OCCS, США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания), CoClass (Швеция), MasterFormat (США), UniFormat (США), Talo 2000 (Финляндия), NS 3451&TFM (Норвегия). Развитие классификационных систем и BIM-технологий в указанных странах сопровождалось проведением активной государственной политики в части стандартизации и регламентирования применения BIM в строительстве [10].

Американская система классификации для строительной отрасли OCCS закреплена к использованию на уровне национальных стандартов в области технологий информационного моделирования в строительстве на территории Соединенных Штатов Америки⁴.

³ Владимир Якушев: «Россия ведет работу по гармонизации строительных стандартов». URL: https://www.faufcc.ru/about-us/news-55421/?sphrase_id=19905/

⁴ National BIM Standard — United States Version 3. National Institute of Building Sciences buildingSMART alliance, 2015. URL : <https://nationalbimstandard.org/buildingSMART-alliance-Releases-NBIMS-US-Version-3/>

Основная цель разработки OmniClass — объединение и унификация существующих национальных классификационных систем, таких как MasterFormat (OmniClass, табл. 22 «Виды работ»), UniFormat (OmniClass, табл. 21 «Элементы»), разработанных объединением североамериканских некоммерческих ассоциаций Construction Specification Institute (CSI, США) и Construction Specifications Canada (CSC, Канада), а также EPIC (табл. 23 «Виды продукции»), в единую унифицированную систему классификации, построенную на методологических принципах стандарта ISO 12006-2⁵.

Согласно официальным данным разработчиков OmniClass⁶, при разработке данной классификационной системы авторы руководствовались следующими базовыми принципами:

- OmniClass является открытым стандартом с возможностью дальнейшего расширения (масштабирования), стандарт доступен для всех участников строительной отрасли;
 - все участники разработки OmniClass обладают полным объемом необходимой информации, их взаимодействие строится на принципах прозрачности всех процессов разработки и полной доступности информации;
 - разработка и совершенствование системы OmniClass осуществляется при условии вовлечения широкого круга представителей строительной отрасли;
 - участие в процессе разработки и развития OmniClass — добровольное и свободное для всех лиц, действительно заинтересованных в развитии и совершенствовании классификационной системы (КС);
 - процесс разработки и дальнейшего внедрения OmniClass должен управляться строительной отраслью в целом, а не каким-либо единственным участником или организацией;
 - система OmniClass ориентирована на терминологию и практику применения в Северной Америке;
 - OmniClass базируется на международных стандартах по классификации (ISO 12006-2:2001 и ISO 12006-3);
 - при развитии OmniClass учитывается практика разработки и применения существующих КС и любых иных исследований, возможных к применению для совершенствования системы OmniClass.
- Согласно принципам, заложенным в ISO 12006-2:2001, любая единица строительной инфор-

⁵ ISO 12006-2. Building construction — Organization of information about construction works — Part 2: Framework for classification.

⁶ OmniClass. A strategy for Classifying the Built Environment. Introduction and User's Guide. Edition: 2.1. The Construction Specifications Institute, Inc. (CSI), 2019. URL : <https://www.csiresources.org/standards/omniclass/>

мации может быть отнесена к одной из трех базовых категорий: строительные ресурсы, строительные процессы или результаты процесса строительства. В свою очередь, базовые категории подразделяются на подкатегории, образуя систему уникальных классификационных таблиц (каждой подкатегории строительной информации соответствуют одна или несколько уникальных классификационных таблиц).

Классификационная система OmniClass практически полностью повторяет структуру и принципы классификации строительной информации, предлагаемые стандартом ISO 12006-2:2001, каждая из пятнадцати классификационных таблиц (КТ), представляющих отдельные уникальные категории строительной информации, может быть отнесена к одной из трех базовых категорий строительной информации:

- табл. 23, 33, 34, 35 и, в меньшей степени 36 и 41, относятся к категории строительных ресурсов;
- табл. 31 и 32 классифицируют строительные процессы, включая стадии ЖЦ объектов строительства;
- табл. 11–22 относятся к результатам строительного процесса.

Унифицированная классификационная система Uniclass 2015⁷ предназначена для всех секторов строительной отрасли Великобритании. Uniclass 2015 состоит из согласованных друг с другом классификационных таблиц, содержащих классы объектов строительной отрасли — от глобальных промышленных, гражданских и инфраструктурных строительных объектов до анкерных болтов и светодиодных ламп. Система Uniclass 2015 также применима для структурирования проектной информации и использования в CAD-системах. Информация о проекте может использоваться на протяжении всего ЖЦ ОКС. Первоначальная работа по классификации велась над семью классификационными таблицами, которые описывали основные виды активов, необходимых для осуществления процесса строительства. Со временем были дополнительно разработаны классификационные таблицы по видам информации, управлению проектами и средствам выполнения строительно-монтажных работ.

Uniclass 2015 состоит из одиннадцати классификационных таблиц, каждая из которых представляет собой отдельную категорию строительной информации. Данные таблиц могут использоваться для выполнения различного рода задач, таких как составление сметной документации, получение объемов работ и прочих количественных и качественных показателей объекта классификации на всем протяжении его ЖЦ.

⁷ Delany S. What is Uniclass 2015? 2017. URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-uniclass-2015>

При выделении категорий строительной информации (наименования классификационных таблиц) учитывались типы отношений между элементами классификации⁷. Благодаря этой особенности применение KC Uniclass 2015 возможно, начиная с самых ранних этапов реализации инвестиционно-строительных проектов.

Методология классификации, заложенная в основе системы Uniclass 2015, аналогично OmniClass, базируется на принципах международного стандарта ISO 12006-2:2015, во многом повторяя структуру КСИ, предлагаемую стандартом ISO 12006-2:2015. Для классификации элементов применяется фасетный метод.

По результатам анализа классификационных таблиц систем OmniClass и Uniclass 2015 применительно к информационному моделированию автомобильных дорог в труде [11] сделан вывод о трех возможных путях выбора системы классификации для информационного моделирования дорог в России: использовать существующие классификаторы и «не изобретать велосипед»; разрабатывать свою систему классификации или разрабатывать общемировую систему классификации для всех строительных секторов в международной кооперации (в таком случае придется привести к единообразию и соответствующие методики строительства, используемые материалы и строительные нормы в целом). С учетом курса на гармонизацию российских стандартов с лучшими международными практиками третий путь также является реализуемым.

Классификационная система CoClass, разрабатываемая на территории Швеции, относится к классу систем, базирующихся на принципах классификации и управления информацией, заложенных в серии международных стандартов ISO/IEC 81346 [12].

Главная цель разработки CoClass — альтернатива для действующего, но устаревшего шведского КСИ BSAB-96, устранение ограничений в части охвата стадий ЖЦ (BSAB-96 применим для стадии проектирования и частично для строительства) и проблем совместимости с технологиями информационного моделирования и цифрового представления данных⁸.

Разработка CoClass является, прежде всего, инициативой государства, реализуемой в качестве первоочередных мер по сокращению затрат в строительном секторе. Согласно исследованиям Шведского строительного центра (AB Svensk Byggtjänst), отсутствие бесшовной технологии передачи данных (информация накапливается и передается во всей

⁸ CoClass — Nya generationen BSAB Klassifikation och tillämpning, Projekt BSAB 2.0, 2017. URL: <https://static.byggjtjanst.se/coclass/pdf/Slutdokumentation-CoClass-v1.2-20161026.pdf> (шведск.).

своей полноте) на всех этапах ЖЦ объекта строительства приносит годовой убыток в размере 60 млрд шведских крон (до 400 млрд руб. в масштабах всей строительной отрасли Швеции)⁹.

По данным официального сайта⁸ проекта CoClass, авторы КС при ее разработке руководствуются следующими главными принципами:

- цифровой формат представления данных — КС должна разрабатываться и иметь применение исключительно в цифровом (электронном) виде для удобства в применении BIM-технологий;
- универсальность представления данных — КС должна охватывать все аспекты строительной информации (наименование системы CoClass, образованное посредством приставки «Со», как раз отражает принцип объединения, совместного использования и универсального подхода при представлении информации);
- использование на протяжении всего ЖЦ объекта строительства — КС должна иметь возможность равно эффективного применения на всех этапах (стадиях) ЖЦ объекта классификации;
- международный статус — КС должна базироваться на методологических принципах международных стандартов;
- простота модификации — КС должна быть гибкой и удобной с точки зрения возможностей будущего изменения и совершенствования.

Принципиальное отличие КС CoClass от многих существующих распространенных систем заключается в том, что система CoClass изначально разрабатывалась как универсальный язык цифрового общения между различными информационными системами. Система CoClass не имеет классической формы представления в бумажном или электронном виде (например, в форме электронных таблиц). Доступ к КС CoClass возможен либо посредством специализированного web-сервиса, который реализует функционал личного кабинета пользователя, либо на уровне программного взаимодействия (CoClass API).

Внутренняя структура КС представлена тремя категориями информации: OBJECTS (Объекты), PROPERTIES (Свойства) и ACTIVITIES (Деятельность). Информация по каждой категории сгруппирована в отдельные уникальные классификационные таблицы: семь таблиц для категории OBJECTS, одна таблица для PROPERTIES и одна таблица для ACTIVITIES.

Организацией, ответственной за внесение последних изменений и актуализацию нововведений, связанных с содержанием и структурой КС, является Шведский центр строительства (Swedish Building Centre).

⁹ CoClass — ett nytt digitalt språk som kan spara miljardier! Svensk Byggtjänst, 2018. URL : <https://youtu.be/WeOKJhs-ftDI/> (swe.).

Система CoClass базируется на принципах ISO 12006-2:2015 и реализует практическую методологию классификации, сформированную в серии стандартов ISO/IEC 81346 [13]. Метод классификации элементов описываемой (строительной) системы фасетный, с фиксированным основанием классификации.

Система CCS (Cuneco Classification System) — датская КС, пришедшая на смену устаревшему DBK [14]. Разработкой данной системы классификации занимается специально созданный правительством Дании в 2011 г. Центр компетенций Cuneco. Результаты практического внедрения и использования КС имели большую практическую ценность и учитывались при пересмотре международного стандарта ISO 12006-2.

Цель КС CCS — стандартизация следующих предметных областей в строительстве [15]:

- классификация и идентификация элементов строительной системы;
- определение необходимых и достаточных уровней информации (LOI) классифицируемых объектов для различных стадий ЖЦ;
- формирование единых правил количественных оценок элементов строительной системы;
- определение необходимых атрибутов для элементов строительной системы.

Классификационная система CCS во многом схожа со шведской классификационной системой CoClass, включая форму представления. Содержание и структура CCS также не имеют классического представления посредством бумажного носителя или электронных таблиц, доступ к содержанию классификатора возможен через специализированный web-сервис или API.

Внутренняя структура КС формируется посредством шести основных категорий информации (Use of Construction Entities, Elements, Construction Aids, Construction Agents, Construction Product и Use of Spaces), каждая из которых представлена соответствующими КТ (одной и более).

При разработке КС организация CCS Cuneco руководствовалась положениями международного стандарта ISO 12006-2:2015.

Методология кодирования и классификации отдельных категорий строительной информации (КТ) хотя и базируется на принципах серии стандартов ISO/IEC 81346, но все же имеет ряд некоторых незначительных отличий [16]. Cuneco планирует в ближайшее время гармонизировать CCS с последней версией стандарта.

Примером отечественного классификатора в сфере строительства является Московская строительная система классификаторов (МССК)¹⁰. Ос-

¹⁰ Классификаторы для информационного моделирования. Описание системы. Редакция 4.0. М., 2019. URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/1115/00_Opisanie_MSSK_40.pdf

новая цель МССК — обеспечение выполнения нормативных требований к цифровым моделям ОКС на этапе прохождения экспертизы проектной документации. Состав МССК в редакции 4.0 представлен тринадцатью КТ, разделенными на четыре категории (раздела): классификаторы цифровой модели местности, классификаторы цифровой модели объекта, классификаторы ресурсов, служебные классификаторы.

Московская система строительных классификаторов отличается детальностью и системным подходом при разработке системы классификации, однако ориентирована прежде всего на обеспечение процедуры прохождения экспертизы. Следствием данной специфики на данный момент является слабая возможность применения МССК на других стадиях ЖЦ строительных объектов. Тем не менее МССК может быть отнесена к референтным системам классификации, обладающим высоким потенциалом для последующей частичной имплементации данных в состав КСИ.

В содержательном обзоре международной нормативной базы в сфере BIM [17] отмечено, что внедрению BIM препятствует действующая нормативная база, не регламентирующая применение BIM-технологий во взаимодействии участников ИСП. Инициативное внедрение BIM-систем отдельными организациями не приводит к ощутимому синергетическому эффекту, достижение которого возможно только при вовлечении всех участников ИСП, включая государство.

В связи с этим и в контексте новой государственной политики по внедрению BIM¹¹ в 2019 г. во исполнение поручения Президента Российской Федерации ПР-1235 от 19.07.2018¹², установившего ряд приоритетных задач, направленных на модернизацию строительной отрасли и повышение качества строительства, Федеральным законом № 151-ФЗ от 27.06.2019¹³ в Градостроительный Кодекс РФ¹⁴ был внесен ряд важных поправок, направленных

на регламентирование применения технологий информационного моделирования в России. В частности, законом введены понятия информационной модели объекта капитального строительства и классификатора строительной информации — информационного ресурса, распределяющего информацию об ОКС и ассоциированную с ними информацию в соответствии с ее классификацией (классами, группами, видами и другими признаками).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрены международные системы классификации строительной информации OmniClass (США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания) и CoClass (Швеция), нашедшие широкое практическое применение в области строительства. Кроме международных КС изучены отечественные классификаторы: классификатор строительных ресурсов, классификатор ОКС по их назначению и функционально-технологическим процессам и МССК. Для разработки требований к структуре и составу общероссийского КСИ произведен сравнительный анализ структур, составов и методологических основ рассмотренных КС.

В статье использованы актуальные материалы ведущих отечественных и зарубежных профильных экспертов, министерств и ведомств по данной тематике. Произведен анализ отечественной нормативно-технической базы и законодательства в области информационного моделирования в строительстве.

Представленное исследование выполнено методами системного подхода, сравнительного анализа и обобщения. Применены эмпирические (описание, сравнение) и теоретические (формализация — построение абстрактно-математических моделей, раскрывающих сущность изучаемых процессов) научно-исследовательские методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования для формирования требований к структуре и составу КСИ проведен сравнительный анализ рассмотренных наиболее применяемых за рубежом КС по критериям, представленным в табл. 1.

Все рассмотренные национальные КС, широко применяемые в настоящее время, базируются на принципах классификации международного стандарта ISO 12006-2. Системы CoClass и CCS также базируются на серии стандартов ISO/IEC 81346.

В стандартах ISO/IEC 81346 (и в базирующихся на них КС) фактически предложена методика перехода от искусственной классификации к естественной, основанной на применении постоянно (внутренне) присущих объектам общих неизменных и неотъемлемых признаков, определяющих

¹¹ Концепция внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования в Российской Федерации. URL : <https://www.faufcc.ru/cifrovoe-razvitie/bim/kontsepciya/Концепция.pdf>

¹² Поручение Президента Российской Федерации от 19.07.2018 № Пр-1235. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550966183/>

¹³ Федеральный закон от 27.06.2019 № 151-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

¹⁴ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ (в редакции, актуальной с 13.08.2019).

Табл. 1. Сравнительная таблица национальных классификационных систем

Критерий сравнения (КС)	OmniClass	Uniclass 2015	CoClass	CCS
Государство-разработчик	США, Канада	Великобритания	Швеция	Дания
Дата публикации первой версии стандарта	2006	2015	2016	2012
Область применения КС	Вся строительная область, полный ЖЦ объекта строительства	Вся строительная область, полный ЖЦ объекта строительства	Вся строительная область, полный ЖЦ объекта строительства	Вся строительная область, полный ЖЦ объекта строительства
Предшествующие КС	MasterFormat, UniFormat, EPIC	SfB (1950) Uniclass (1997) Uniclass 2 (2013)	SfB (1950) BSAB 96	BC/SfB (1950) DBK (2006)
Возможность вертикального расширения КС	+	+	–	–
	Введение дополнительных уровней иерархии	Введение дополнительных уровней иерархии	Принципы классификации ISO 81346 подразумевают отсутствие необходимости вертикального масштабирования	Отсутствие необходимости вертикального масштабирования
Возможность горизонтального расширения КС	+	+	+	+
	Введение промежуточных цифровых кодов	За счет введения промежуточных цифровых кодов	За счет использования дополнительных букв алфавита и использования зарезервированных классов	За счет использования дополнительных букв алфавита и использования зарезервированных классов
Возможность интеграции других КС	–	–	В качестве свойства объекта классификации	В качестве свойства объекта классификации
Интегрированные КС	MasterFormat, UniFormat, EPIC	–	–	–
Нормативная база классификации	ISO 12006-2:2001 ISO 12006-3	ISO 12006-2:2015 (частично)	ISO 12006-2:2015 ISO 12006-3 ISO/IEC 81346-2 ISO 81346-12	ISO 12006-2:2015 ISO 12006-3 ISO/IEC 81346-2 ISO 81346-12
Метод классификации	Фасетный	Фасетный	Фасетный, с фиксированным основанием классификации	Фасетный, с фиксированным основанием классификации
Количество категорий классификации (КТ)	15	11	9	9
Максимальный уровень иерархической вложенности классификационных таблиц	7	4	3 + 1	3
Стандарт формирования кода классификатора	–	–	ISO 81346-1, ISO 81346-12	ISO 81346-1, ISO 81346-12
Пример кода классификатора	32-49 51 13 11	Pr_15_31_04_86	UAA	QQC
Аспекты классификации в идентифицирующем коде	–	–	Function-ID Product-ID Location-ID Type-ID	Function-ID Product-ID Multi-lvl product-ID Location-ID Type-ID Multi-level type-ID
Формат представления	Электронные таблицы	Web-сервис	Web-сервис	Web-сервис
API	–	NBS BIM Toolkit API	CoClass API	Cuneco CCS service web API

множество других сходных свойств этих объектов. Согласно работе [18], естественная классификация отражает происхождение вещей и является «генетической». Все остальные признаки классификации выносятся за рамки классифицируемых объектов и являются атрибутами (или параметрами), присущими объекту, но не участвующими в классификации. Данные атрибуты способны меняться на протяжении всего ЖЦ объекта классификации, однако их изменение не затрагивает основание классификации, следовательно, объект способен иметь неизменный идентификатор кода классификации на протяжении всего ЖЦ.

Рассмотрим сравнение подходов к классификации в различных системах на примере архитектурного объекта «Дверь».

В классификационной таблице Products системы OmniClass (Table 23) объект «Дверь» может быть классифицирован одним из 120 возможных вариантов. В табл. 2 представлены подклассы 1-го уровня классификации для объекта «Door» (23-17 11 00).

Таким образом, все 120 подклассов объекта «Door» в рамках одного уровня иерархического представления (23-17 11 00) классифицируются по одному из трех различных признаков: материал исполнения двери, функциональное назначение и принцип устройства двери. Это означает, что, например, для объекта «Металлическая противопожарная управляемая дверь» одновременно могут существовать три различных кода классификатора:

23-17 11 13 (Metal Doors), 23-17 11 31 (Fire Doors) и 23-17 11 37 (Controlled Environment Doors). Подобные случаи неоднозначности при назначении идентификационного кода классификатора являются серьезным препятствием использования подобных КС на уровне программного взаимодействия информационных систем, применяемых на протяжении ЖЦ строительного объекта.

С точки зрения процессов управления информацией подобные принципы классификации приводят еще к одному нежелательному последствию — код классификатора (выступающий в роли идентификатора) в случае изменения признаков (характеристик) объекта классификации (например, в процессе эксплуатации) является переменной характеристикой, что идет в разрез с требованием неизменности идентифицирующих кодов объектов классификации на всех стадиях ЖЦ объекта строительства.

В датской системе CCS объект «Дверь» (KT Components) теперь может быть классифицирован одним единственным (а не 120 возможными, как в примере с КС OmniClass) способом — QQC (табл. 3). Объект «Дверь» относится к технической системе Wall construction (AD) и функциональной системе Wall System (B).

Для объекта «Металлическая противопожарная управляемая дверь» идентифицирующий код согласно функциональному аспекту (символ «=>» в коде) равно как и для объекта «Стеклянная дверь маятникового типа» может быть записан

Табл. 2. Подклассы первого уровня объекта «Дверь» системы OmniClass

Код	Наименование класса	Перевод	Признак классификации
23-17 11 13	Metal Doors	Металлические двери	Материал исполнения двери
23-17 11 15	Wood Doors	Деревянные двери	
23-17 11 17	Plastic Doors	Пластиковые двери	
23-17 11 19	Composite Doors	Двери из композитного материала	
23-17 11 21	Glassed Doors	Стеклянные двери	
23-17 11 27	Access Doors	Служебные двери / двери люка	Функциональное назначение двери
23-17 11 31	Fire Doors	Противопожарные двери	
23-17 11 37	Controlled Environment Doors	Двери для регулируемых условий среды	Функциональное назначение двери
23-17 11 39	Detention Doors	Двери для тюрем	Функциональное назначение двери
23-17 11 41	Hanger Doors	Подвесные двери	Принцип устройства двери
23-17 11 43	Lightproof Doors	Светонепроницаемые двери	
23-17 11 45	Traffic Doors	Маятниковая дверь	
23-17 11 47	Pressure Resistance Doors	Двери, устойчивые к давлению	Функциональное назначение двери
23-17 11 49	Security Rated Doors	Защитные двери	

в виде [E]=B.AD.QQC001 и оставаться неизменным на всем протяжении ЖЦ рассматриваемого объекта «Дверь», поскольку он базируется на основании, отражающем суть объекта.

Табл. 3. Классификация объекта «Door» согласно классификационной таблице Components

Код	Наименование класса
Q_	Opening and closing component
QQ_	Access granting component
QQC	Door

При этом другие свойства объекта «Дверь» (материал, конструктивное исполнение, специальное назначение) отнесены к его характеристикам и могут быть определены по отдельным КТ (например, Properties в CoClass). Подобная система классификации имеет все основания называться естественной классификацией, базирующейся на неизменных признаках объектов, составляющих суть объекта классификации и отражающих его назначение. Согласно работе [18], чем ближе вещи друг к другу «генетически», тем большим числом одинаковых свойств они обладают и тем меньше они различаются между собой. Вследствие этого структура и состав КТ систем CCS и CoClass кардинально отличаются от структуры и состава таблиц Omniclass и Uniclass 2015. В табл. 4 представлены количественные параметры таксономий для КС Omniclass, Uniclass 2015, CCS и CoClass.

Табл. 4. Сравнение таксономий КТ для различных КС

Наименование КС	Классификационная таблица	Количество классов	Максимальный уровень иерархической вложенности
OmniClass	Table 23 Products	6887	7
Uniclass 2015	Pr - Products	7210	4
CCS, CoClass	Components	750	3

С учетом табл. 4, можно сделать вывод о том, что главная цель методологии классификации, сформулированной в серии стандартов ISO/IEC 81346, — формирование простых и удобных в использовании структур классификации, базирующихся на принципах универсальности представления информации, минимизации и постоянстве классификационных признаков, основанных на неотъемлемых признаках объектов классификации (естественные основания классификации). Данные принципы всецело способствуют созданию естественных КС.

По результатам сравнения КС в рамках настоящего и проведенных ранее исследований¹⁵ предложено разделение всех КС в строительстве (в за-

¹⁵ Формирование общих подходов к организации информации для обеспечения управления ЖЦ зданий и сооружений с использованием ИМ и разработка методики классификации строительной информации. URL: https://www.faufcc.ru/cifrovoe-razvitiye/bim/klassifikator/Презентация_НИЦ_ЦПС_v3_005.pdf

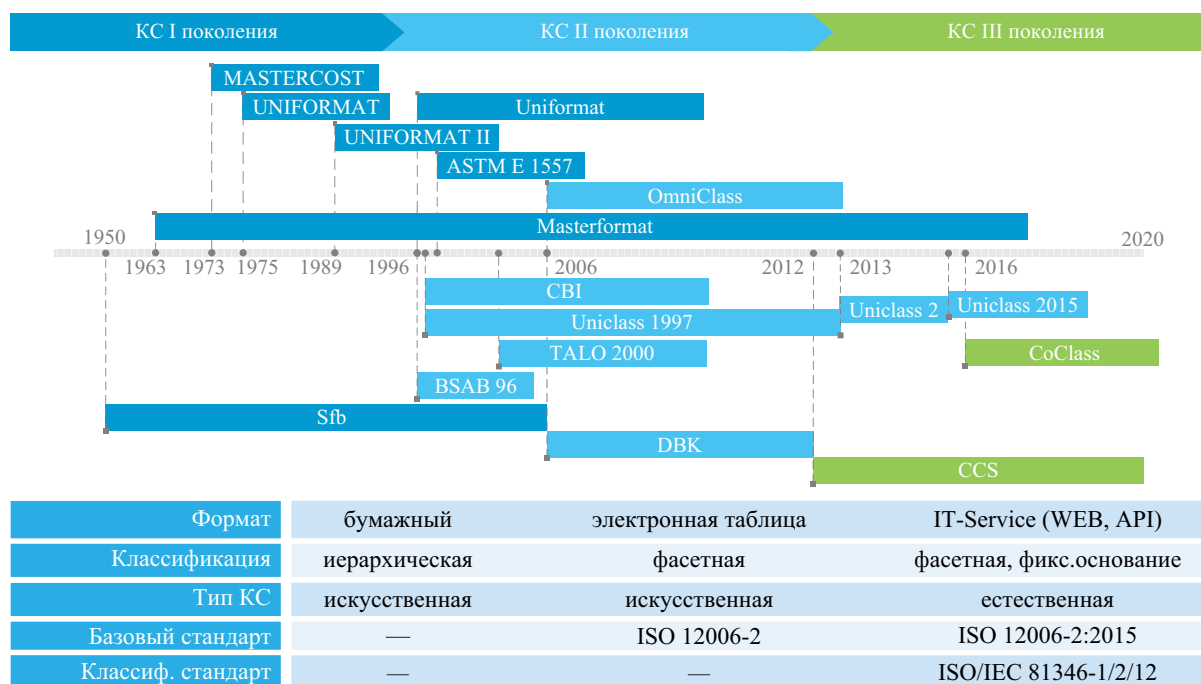


Рис. 1. Три поколения классификационных систем в строительстве

висимости от особенностей их организации) на три базовые категории — поколения (рис. 1):

- классификационные системы — родоначальники, первое поколение;
- классификационные системы на базе ISO 12006-2:2001 и ISO 12006-2:2015 — второе поколение;
- классификационные системы на базе ISO 12006-2:2015 и серии стандартов ISO/IEC 81346 — третье поколение («цифровые» классификационные системы на принципах естественной классификации).

Принципы классификации и формирования внутренней структуры разрабатываемого КСИ должны основываться на передовом опыте разработки и применения существующих КС. В рамках разработки структуры и состава КСИ сформулированы следующие базовые требования:

- неизменность кодовых обозначений всех элементов строительной информации на всем протяжении ЖЦ ОКС;
- уникальность кодового обозначения (каждый элемент должен обладать своим уникальным кодом в рамках проекта);
- однозначность критериев классификации (классификация не должна содержать таких классов, как «другие», «не вошедшие в перечень» или «разнообразные», т.е. классов, которые не могут быть четко определены);
- обеспечение полноты информации о компоненте модели (код должен указывать принадлежность компонента к определенной системе, классу оборудования, месту размещения, иерархии расположения и т.д.);
- возможность расширения (без перекодировки) информационного представления существующих объектов классификации, в случае возникновения новых материалов, работ, ролей, технологий и пр.;
- независимость языка кодирования от национального языка с целью обеспечения возможности международного применения классификатора;
- возможность обеспечения обмена данными между КСИ и другими КС, имеющими широкое применение за рубежом.

В рамках исследования также проведен анализ ряда основных действующих нормативно-правовых актов в сфере градостроительной деятельности в части требований по учету стадий ЖЦ ОКС, направленности на процессы информационного моделирования ОКС, учета систем классификации и классификаторов строительной информации различного рода.

В соответствии со ст. 5 Федерального закона от 27.06.2019 № 151-ФЗ в Градостроительный кодекс введены важные для информационного моделирования в строительстве определения и положения, фактически обеспечивающие интеграцию

понятий (терминов) ИМ и КСИ в градостроительную деятельность РФ:

- часть требований и положений ГрК РФ в части ИМ и КСИ вступают в силу в 2020 и 2022 гг., что обусловлено необходимостью реализации этапов Концепции внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования в Российской Федерации в части разработки КСИ и требований к ИМ ОКС;
- информационная модель ОКС сможет выступать как дополнением, так и эквивалентом проектной документации;
- согласно определению (ч. 1 ст. 57⁶) и устанавливаемому порядку использования (ч. 2 ст. 57⁶), КСИ является неотъемлемым (обязательным к применению) ресурсом при формировании и ведении ИМ ОКС;

- с учетом охвата требованиями ГрК РФ всех этапов ЖЦ ОКС, структура и состав КСИ должны обеспечивать возможность формирования и ведения ИМ ОКС на всех этапах их ЖЦ;

- в ч. 1 ст. 57⁵ ГрК РФ впервые определено лицо, ответственное за обеспечение формирования и ведения ИМ ОКС, — застройщик, технический заказчик, лицо, обеспечивающее или осуществляющее подготовку ОБИН, и (или) лицо, ответственное за эксплуатацию ОКС, что вносит определенность в части разделения ответственности и организации соответствующих работ между участниками ИСП.

Анализ Постановлений Правительства РФ от 19.01.2006 № 20¹⁶, от 16.02.2008 № 87¹⁷ и от 05.03.2007 № 145¹⁸ показал следующее.

В тексте Постановлений Правительства РФ от 19.01.2006 № 20 отсутствуют требования или положения в части ИМ ОКС или КСИ. В ч. 6 Положения упоминается требование к форме приложений к отчетной документации о выполнении инженерных изысканий — «текстовая, графическая, цифровая и иная формы». Очевидно, ч. 6 Положения о выполнении инженерных изысканий по Постановлению Правительства РФ от 19.01.2006 № 20 должна быть актуализирована в соответствии с ч. 4²

¹⁶ Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства : Постановление Правительства РФ от 19.01.2006 № 20 (в редакции, актуальной с 2 июля 2019 г.).

¹⁷ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 (в редакции, актуальной с 17 июля 2019 г.).

¹⁸ О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий : Постановление Правительства РФ от 05.03.2007 № 145 (в редакции, актуальной со 2 ноября 2018 г.).

ст. 47 ГрК РФ в части дополнения о подготовке результатов инженерных изысканий в форме, позволяющей осуществлять их использование при формировании и ведении информационной модели.

В тексте рассматриваемого Положения по Постановлению № 87 также пока отсутствуют требования или положения в части применения ИМ ОКС или КСИ. В части формы предоставления проектной документации указываются только текстовая и графическая формы.

В связи с изменениями в части п. 12 ст. 48 ГрК РФ, внесенными Федеральным законом от 03.08.2018 № 342-ФЗ и вступившими в силу с 01.07.2019, состав разделов проектной документации по Постановлению № 87 требует актуализации для приведения в соответствие с ГрК РФ. С другой стороны, в основе Положения № 87 в текущем виде заложен документ-центричный подход, в то время как применение BIM-технологий предполагает применение дата-центричного подхода. Иначе говоря, разработке и экспертизе подлежат прежде всего проектные решения (формализованные методами информационного моделирования), а не проектные документы.

Очевидно, что в ходе реализации Концепции внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования структура и состав требований Положения по Постановлению № 87 должны быть коренным образом переработаны.

В тексте рассматриваемого Положения по Постановлению № 145 требования или положения в части применения ИМ ОКС или КСИ также пока отсутствуют. В части формы предоставления проектной документации и (или) результатов инженерных изысканий в п.(л) ч. 2 Положения с 1.01.2017 допускается только электронная форма за исключением случаев, когда проектная документация и (или) результаты инженерных изысканий содержат сведения, составляющие государственную тайну.

Хотя, в отличие от Положения о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию, в требованиях Положения по Постановлению № 145 реализован переход к электронному документообороту, следует отметить, что речь по-прежнему идет о наборе привычных документов, но уже в электронном формате (например, pdf).

С учетом новой государственной политики в области внедрения BIM в перспективе в рамках цифровой экспертизы должна рассматриваться непосредственно ИМ ОКС (а не проектная документация) с доработкой по замечаниям экспертов, для чего необходима разработка набора требований к представляемому на экспертизу ИМ, их атрибутивному наполнению и степени детализации.

Для перехода к цифровой экспертизе проектной документации ОКС необходимы не только переход проектных организаций к проектированию на основе BIM-технологий, но и изменение соответствующей нормативной базы (корректировка Постановления № 87, разработка новых НТД), разработка процедур автоматизированного учета изменений в ПД экспертами, внедрение систем управления требованиями и конфигурациями.

На основании проведенного анализа зарубежных систем классификации, международных стандартов в области КСИ, анализа действующего российского законодательства в сфере градостроительной деятельности, анализа существующих российских классификаторов и КС в области строительства сформирован сводный перечень требований к структуре и составу разрабатываемого КСИ (табл. 5).

На основании сформулированных требований НИЦ ЦПС разработаны структура и состав КСИ.

Структура КСИ представлена посредством отдельных классов строительной информации, распределенных по базовым категориям информации и объединяемых друг с другом с помощью моделируемых отношений (или связей). Все классы строительной информации и соответствующие им КТ, согласно ISO 12006-2:2015, относятся к одной из четырех базовых категорий строительной информации (ресурс, процесс, результат и характеристика).

Базовые категории строительной информации позволяют моделировать основной процесс, характерный для строительного сектора и заключающийся в том, что получение некоторого определенного результата (строительного) является прямым следствием ряда процессов взаимодействия с некоторыми ресурсами (строительными). Ресурс, процесс и результат обладают (характеризуются) рядом универсальных или специфических характеристик (рис. 2). Данная конфигурация отношений между базовыми категориями строительной информации является универсальной и сохраняется на всем протяжении ЖЦ ОКС.

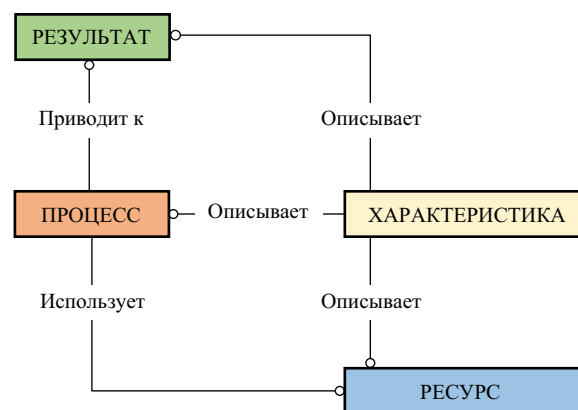


Рис. 2. Отношения между базовыми категориями строительной информации

Табл. 5. Перечень требований к структуре и составу КСИ

№ требования	Формулировка требования
1	КСИ должен быть ориентирован на объединение и унификацию существующих классификаторов и КС
2	КСИ должен быть открытым стандартом с возможностью дальнейшего расширения (масштабирования) своего содержания
3	Информационное насыщение КСИ должно осуществляться при условии вовлечения широкого круга представителей профессионального сообщества строительной отрасли
4	Разработка, ведение и дальнейшее совершенствование классификатора строительной отрасли должны находиться в зоне ответственности специализированного исполнительного органа — государственной организации
5	КСИ должен базироваться на международных стандартах
6	При разработке КСИ должен быть учтен опыт разработки и эксплуатации существующих в строительной отрасли классификаторов и КС
7	КТ КСИ должны иметь систему статусов состояния таблиц («в разработке», «проект», «выпущен» и т.п.)
8	КСИ должен носить универсальный характер применения: он должен применяться для объектов гражданского строительства, объектов промышленности, линейных объектов и прочих объектов капитального строительства
9	КСИ должен быть применим на всех стадиях ЖЦ ОКС
10	КСИ должен иметь высокую степень совместимости с технологиями информационного моделирования в строительстве
11	КСИ должен иметь гибкую структуру представления, адаптированную для задач возможного масштабирования и внесения изменений как в структуру, так и в состав классификатора
12	Разрабатываемая структура КСИ должна быть основана на нормативных положениях международного стандарта ISO 12006-2:2015
13	Разрабатываемая структура КСИ должна быть отображена с применением графической нотации представления ИМ EXPRESS-G
14	КТ (предметным областям строительства) КСИ должны быть присвоены уникальные коды-идентификаторы, позволяющие однозначно интерпретировать принадлежность классов информации к определенной предметной области строительства (КТ)
15	Структура КСИ должна базироваться на принципах международного стандарта ISO 12006-2:2015
16	Внутритабличное представление КСИ (методология классификации и группировки) должно базироваться на принципах серии международных стандартов ISO/IEC 81346
17	Структура КСИ должна быть универсальной и содержать классификационные таблицы и классы, используемые на всех стадиях ЖЦ ОКС
18	Принципы структурного построения КСИ должны позволять интегрировать в состав КСИ существующие классификаторы (государственные и корпоративные)
19	Принципы кодирования КСИ должны поддерживать возможность формирования универсальных кодов классифицируемых объектов, неизменных на протяжении их ЖЦ
20	КСИ должен быть интегрирован в состав информационных систем, ориентированных на технологии информационного моделирования и задействованных в процессе реализации ИСП
21	КСИ должен содержать информацию о строительных элементах, строительных характеристиках, ОКС, стадиях ЖЦ ОКС и строительной продукции

Каждая из базовых категорий (процесс, ресурс, результат, характеристика) декомпозируется на ряд отдельных классов строительной информации, принадлежащих к своей категории. Каждому классу строительной информации соответствует своя КТ. Одна КТ может соответствовать нескольким базовым классам строительной информации. Предлагаемый состав КСИ представлен в табл. 6.

Для однозначной идентификации классов строительной информации каждой КТ назначен уникальный трехсимвольный буквенный код, представляющий собой аббревиатуру из первых букв слов, входящих в наименование соответствующей КТ (например, СтИ — строительные изделия, или СЖЦ — стадии жизненного цикла ОКС). Кодовые обозначения КТ также имеют альтернативные коды, сформированные из букв латинского алфавита.

Базовые классы строительной информации связаны друг с другом посредством отношений (связей). Данные отношения между классами позволяют моделировать взаимные связи между различными классами путем добавления дополнительных полей в тело КТ.

Например, КТ № 21 «Характеристики» содержит классы, представляющие собой характеристики для классов таблицы № 6 «Компоненты». Соответственно, добавление поля «Код компонента» в КТ «Характеристики» позволит установить взаимно однозначное соответствие между определенным компонентом и соответствующими ему характеристиками. Вариации отношений (связей) между базовыми категориями и классами приведены в табл. 7.

Табл. 6. Состав классификатора строительной информации

Базовая категория строительной информации	Базовый класс строительной информации	Номер КТ	Код КТ	Наименование КТ
Результат	Зона	1	ПЗо/RZo	Помещения и зоны
	Помещение			
	Комплекс объектов капитального строительства	2	КОС/CCo	Комплексы объектов капитального строительства
	Объект капитального строительства	3	ОКС/CEп	Объекты капитального строительства
	Функциональная система	4	ФнС/FnS	Функциональные системы
	Техническая система	5	ТхС/TeS	Технические системы
	Компонент	6	Ком/Com	Компоненты
Процесс	Управление	7	УПр/Mng	Управление процессами
	Стадия ЖЦ ОКС	8	СЖЦ/LCS	Стадии ЖЦ ОКС
	Процесс инженерных изысканий	9	ПИИ/PER	Процессы инженерных изысканий
	Процесс проектирования	10	ППр/PDe	Процессы проектирования
	Процесс строительства	11	ПСт/PCo	Процессы строительства
	Процесс эксплуатации	12	ПЭк/PMn	Процессы эксплуатации
	Процесс реконструкции	13	ПРк/PRe	Процессы реконструкции
	Процесс капитального ремонта	14	ПКР/PRf	Процессы капитального ремонта
	Процесс сноса здания или сооружения	15	ПСЗ/PUt	Процессы сноса зданий или сооружений
Ресурс	Строительное изделие	16	СтИ/CPp	Строительные изделия
	Строительный материал	17	СтМ/CMa	Строительные материалы
	Вспомогательный ресурс	18	ВсР/ARe	Вспомогательные ресурсы
	Трудовой ресурс	19	ТрР/Hre	Трудовые ресурсы
	Информация	20	Инф/Inf	Информация
Характеристика	Характеристика	21	Хрк/Prp	Характеристики

Табл. 7. Отношения между базовыми классами строительной информации

Базовый класс (категория) строительной информации (субъект)	Тип связи	Базовый класс (категория) строительной информации (объект)
Помещение	Может быть частью	Зона
	Является типом	Искусственно созданное пространство
Зона	Является типом	Искусственно созданное пространство
Искусственно созданное пространство (абстрактный класс)	Является типом	Результат
	Определяется через	Результат
Результат	Представлен в виде	Информация
Комплекс объектов капитального строительства	Является типом	Результат
	Совокупность	Объект капитального строительства
Объект капитального строительства	Является типом	Результат
Строительный элемент (абстрактный класс)	Является типом	Результат
	Является частью	Объект капитального строительства
Компонент	Является типом	Строительный элемент
	Является частью	Техническая система
	Может быть частью	Компонент
Техническая система	Является частью	Функциональная система
	Является типом	Строительный элемент
	Может быть частью	Техническая система
Функциональная система	Является типом	Строительный элемент
Процесс	Приводит к	Результат
	Использует	Ресурс
	Происходит в течение	Стадия ЖЦ ОКС
Управление процессом	Является частью	Процесс
	Осуществляет контроль	Процесс
Процесс инженерных изысканий	Является типом	Процесс
Процесс проектирования	Является типом	Процесс
Процесс строительства	Является типом	Процесс
Процесс эксплуатации	Является типом	Процесс
Процесс реконструкции	Является типом	Процесс
Процесс капитального ремонта	Является типом	Процесс
Процесс сноса здания или сооружения	Является типом	Процесс
Характеристика	Описывает	Результат
	Описывает	Процесс
	Описывает	Ресурс
Строительное изделие	Является типом	Ресурс
	Выполнено из	Строительный материал
Строительный материал	Является типом	Ресурс
Вспомогательный ресурс	Является типом	Ресурс
Трудовой ресурс	Является типом	Ресурс
Информация	Является типом	Ресурс

На основании определения базовых категорий строительной информации (рис. 2), соответствующих им базовых классов (табл. 6) и возмож-

ных отношений между ними (табл. 7) разработана модель представления структуры КСИ в нотации EXPRESS-G (рис. 3).

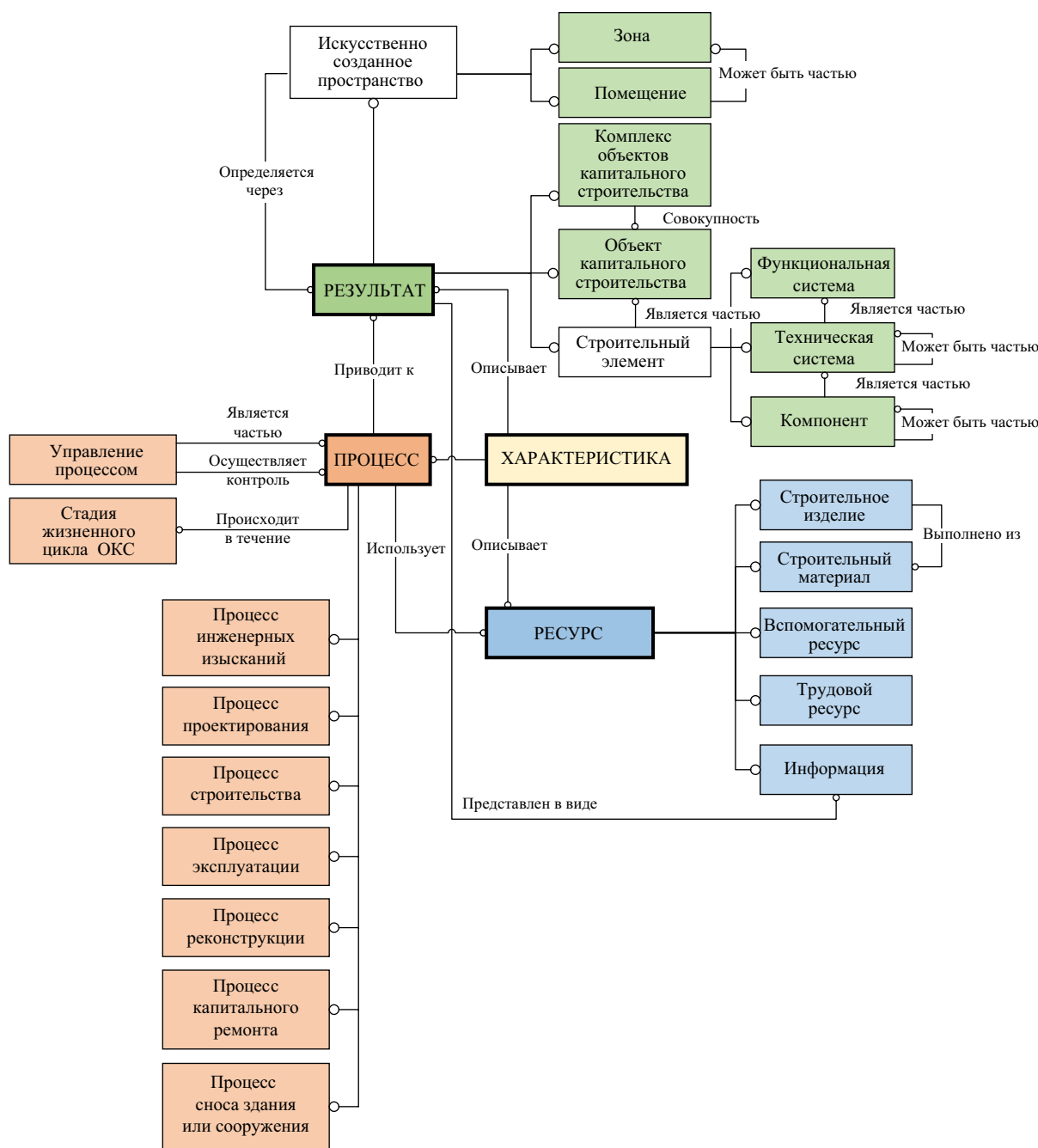


Рис. 3. Схема базовых категорий, классов строительной информации и их отношений в нотации EXPRESS-G¹⁹

¹⁹ Прямоугольники с текстовым полем внутри обозначают отдельные категории или классы строительной информации. Прямоугольники без цветового заполнения (например, «Искусственно созданное пространство», «Строительный элемент») означают абстрактные классы, т.е. классы строительной информации, введенные для обобщения классов — наследников, но не имеющие собственной реализации (отсутствие соответствующих им КТ). Прямоугольники с цветовым обозначением и толстой линией рамки обозначают базовые категории строительной информации («Результат», «Процесс», «Ресурс», «Характеристики»). Прямоугольники с цветовым обозначением и тонкой линией рамки обозначают базовые классы строительной информации («Функциональная система», «Компонент» и проч.), реализованные посредством соответствующих классификационных таблиц строительной информации («Функциональные системы», «Компоненты» и проч.).

На основе предложенной структуры и состава КСИ и с учетом существующей базы для классификации произведено распределение существующих информационных источников классификационной базы по соответствующим КТ КСИ для задач дальнейшего формирования содержания КТ (табл. 8).

Табл. 8. Распределение классификационной базы по КТ

Номер КТ	Код КТ	Наименование КТ	Информационные источники для анализа в целях включения в содержание КТ/Референтные КТ существующих систем классификации
1	ПЗо	Помещения и зоны	Информационные источники: - Нормативно-техническая база в строительстве - IEC 81346-2:2019 Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 2: Classification of objects and codes for classes Структура КТ: - IEC 81346-2:2019, Table 4 Референтные КТ: - Uniclass 2015 — Spaces / locations - OmniClass — Table 13 Spaces by functions - OmniClass — Table 14 Spaces by form - CoClass — UT Built space - CCS — Use of spaces - МССК — Помещения и зоны
2	КОС	Комплексы ОКС	Информационные источники: - Классификатор ОКС по их назначению и функционально-технологическим процессам (ФАО «Главгосэкспертиза России») - ОКОФ 2 — Общероссийский классификатор основных фондов Референтные КТ: - CoClass — BX Construction complex - CCS — Use of Construction Entities - Uniclass 2015 — Co Complexes - Uniclass 2015 — En Entities - Uniclass 2015 — Ac Activities - OmniClass — Table 11 Construction entities by function - OmniClass — Table 12 Construction entities by form - МССК — Виды и назначение ОКС
3	ОКС	ОКС	
4	ФнС	Функциональные системы	Информационные источники: - Нормативно-техническая база в строительстве (в части Постановления Правительства № 1521) - ISO/IEC 81346-12:2018, A.1, A.2 Структура КТ: - ISO/IEC 81346-12:2018 Industrials systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 12: Construction works Референтные КТ: - CCS / CoClass — Technical Systems - CCS / CoClass — Functional Systems - МССК — Системы - Uniclass 2015 — Ss Systems 07
5	ТхС	Технические системы	
6	Ком	Компоненты	Информационные источники: - Нормативно-техническая база в строительстве (в части Постановления Правительства № 1521) - IEC 81346-2:2019, Table 3 Структура КТ: - IEC 81346-2:2019, Table 3

Продолжение табл. 8

Номер КТ	Код КТ	Наименование КТ	Информационные источники для анализа в целях включения в содержание КТ/Референтные КТ существующих систем классификации
			Референтные КТ: - OmniClass — Table 23 Products - OmniClass — Table 21 Elements - Uniclass 2015 — Pr Products - Uniclass 2015 — EF Elements / functions - CoClass — KO Components - CCS — Components - МССК — Элементы
7	УПр	Управление процессами	Информационные источники: - ГОСТ Р ИСО 21500-2014. Руководство по проектному менеджменту - ГОСТ Р ИСО 10006-2005. Системы менеджмента качества. Руководство по менеджменту качества при проектировании - PMBOK (Project management Body of Knowledge) - ICB (IPMA Competence Baseline) Референтные КТ: - OmniClass — Table 32 Services - Uniclass 2015 — PM Project Management - МССК — Управление информацией
8	СЖЦ	Стадии ЖЦ ОКС	Информационные источники: - ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ Референтные КТ: - OmniClass — Table 31 Phases
9	ПИИ	Процессы инженерных изысканий	Информационные источники: - действующее российское законодательство в сфере градостроительной деятельности - нормативно-техническая база в строительстве (в части процессов на всем протяжении ЖЦ ОКС) - ОКВД 2 — Раздел F. Строительство - ОКПД 2 — Общероссийский классификатор продукции по видам деятельности (Раздел F — Сооружения и строительные работы) - ГЭСН-2001 — Общестроительные работы - ГЭСНр-2001 — Ремонтные работы - ГЭСНм-2001 — Монтажные работы - ГЭСНмр-2001 — Капитальный ремонт оборудования - ГЭСНп-2001 — Пусконаладочные работы Референтные КТ: - OmniClass — Table 22 Work results - CoClass — PR Work result - CoClass — FA Maintenance activities
10	ППр	Процессы проектирования	
11	ПСт	Процессы строительства	
12	ПЭк	Процессы эксплуатации	
13	ПРк	Процессы реконструкции	
14	ПКР	Процессы капитального ремонта	
15	ПСЗ	Процессы сноса зданий или сооружений	
16	СтИ	Строительные изделия	Информационные источники: - ОК КСР — Классификатор строительных ресурсов, в части: - Книга 05 — Изделия из бетона, цемента, гипса - Книга 06 — Изделия керамические строительные - Книга 07 — металлоконструкции строительные и их части из черных металлов - Книга 08 — Изделия металлические, металлопрокат, канаты - Книга 09 — металлоконструкции строительные и их части из алюминия и алюминиевых сплавов

Номер КТ	Код КТ	Наименование КТ	Информационные источники для анализа в целях включения в содержание КТ/Референтные КТ существующих систем классификации
			• Книга 10 — Изделия, прокатно-тянутые из цветных металлов и цветные металлы • Книга 11 — Изделия и конструкции из дерева и пластмассовых профилей • Книга 13 — Изделия из природного камня • Книга 15 — Малые архитектурные формы • Книга 21 — Продукция кабельная • Книга 23 — Трубы и трубопроводы, фасонные и соединительные части, фитинги металлические • Книга 24 — Трубы и трубопроводы, фасонные и соединительные части, фитинги из других материалов, кроме бетонных • Книга 61 — Оборудование и устройства электронные связи, радиовещания, телевидения, охранно-пожарная сигнализация • Книга 62 — Оборудование, устройства и аппаратура электрические • Книга 63 — Оборудование, устройства и аппаратура для систем теплоснабжения • Книга 64 — Оборудование, устройства и аппаратура для систем вентиляции и кондиционирования воздуха • Книга 65 — Оборудование, устройства и аппаратура для водоснабжения и канализации • Книга 66 — Оборудование, устройства и аппаратура для системы газоснабжения • Книга 67 — Лифты • Книга 68 — Насосы и станции для перекачки и поднятия жидкостей • Книга 69 — Арматура трубопроводная и воздуховодная с электроприводом • Книга 77 — Оборудование для строительства железных дорог • Книга 79 — Оборудование атомных станций для объектов атомного строительства Материалы ФСНБ-2001: • Часть 2. Строительные конструкции и изделия • Часть 4. Бетонные, железобетонные и керамические изделия. Нерудные материалы. Товарные бетоны и растворы • ОК ЕСКД — Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов Референтные КТ: • OmniClass — Table 23 Products • Uniclass 2015 — Pr Products • МССК — Строительные изделия и материалы
17	СтМ	Строительные материалы	Информационные источники: • ОК КСР — Классификатор строительных ресурсов, в части: • Книга 12 — Материалы и изделия кровельные рулонные, гидроизоляционные и теплоизоляционные, звукоизоляционные, черепица • Книга 14 — Материалы лакокрасочные антикоррозийные, защитные и аналогичные покрытия, клеи • Книга 16 — Материалы для садово-паркового и зеленого строительства • Книга 17 — Материалы и изделия огнеупорные • Книга 18 — Материалы и изделия для систем водоснабжения, канализации, теплоснабжения, газоснабжения • Книга 19 — Материалы и изделия для систем вентиляции и кондиционирования воздуха

Окончание табл. 8

Номер КТ	Код КТ	Наименование КТ	Информационные источники для анализа в целях включения в содержание КТ/Референтные КТ существующих систем классификации
			- Книга 20 — Материалы монтажные и электроустановочные, изделия и конструкции - Книга 22 — Материалы для систем и сооружений связи, радиовещания и телевидения - Книга 25 — Материалы для строительства железных дорог - Книга 26 — Материалы и изделия для метрополитенов и тоннелей - Книга 27 — Материалы и изделия для сетей экологически чистого транспорта Материалы ФСНБ-2001: - Часть 1. Материалы для общестроительных работ - Часть 3. Материалы и изделия для санитарно-технических работ - Часть 5. Материалы, изделия и конструкции для монтажных и специальных строительных работ Референтные КТ: - OmniClass — Table 41 Materials - МССК — Строительные изделия и материалы
18	ВсР	Вспомогательные ресурсы	Информационные источники: - ОК КСР — Классификатор строительных ресурсов, в части: - Книга 91 — Машины и механизмы - Машины и механизмы ФСНБ-2001 Референтные источники: - OmniClass — Table 35 Tools - Uniclass 2015 — TE Tools and Equipment - CCS — Constructions aids components - CCS — Construction aids functional systems - МССК — строительная техника и оборудование
19	ТрР	Трудовые ресурсы	Информационные источники: - ОКПДТР — Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов - ЕТКС — Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих Референтные источники: - OmniClass — Table 33 Products - OmniClass 34 — Organization roles - CCS — Construction agents
20	Инф	Информация	Информационные источники: - ОКУД — Общероссийский классификатор управленческой документации Референтные источники: - OmniClass — Table 36 Information - Uniclass 2015 — Fi Forms of information - Uniclass 2015 — Zz CAD - МССК — Управление информацией
21	Хрк	Характеристики	Информационные источники: - действующее российское законодательство в сфере градостроительной деятельности - нормативно-техническая база в строительстве Референтные источники: - OmniClass — Table 49 Properties - CoClass — Property - CCS — Classes of properties - МССК — Параметры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полноценное внедрение технологий информационного моделирования на всех этапах ЖЦ ОКС подразумевает эффективное и «бесшовное» управление информацией ОКС. Эффективное управление информацией обуславливается, прежде всего, ее структурированностью, связностью и однозначностью интерпретации и обеспечивается применением классификационных систем строительной информации.

Разработка национального КСИ — первоочередной этап на пути к внедрению и применению технологий информационного моделирования в рамках строительной отрасли. Полноценное внедрение КСИ положит начало применению единого универсального «языка общения», используемого всеми участниками реализации ИСП и отвечающего условиям его однозначной интерпретации (одно из условий обеспечения «машиночитаемости»).

Согласно проведенному анализу мировой практики КСИ на примере существующих широко применяемых зарубежных систем строительной классификации (OmniClass, Uniclass 2015, CCS, CoClass) наиболее развитыми с технологической и методологической точек зрения являются КС «третьего поколения», которые также можно назвать «цифровыми» классификационными системами. Представителями данной категории КС являются датская CCS и шведская классификационная система CoClass.

Стандарт ISO 12006-2:2015 и серия стандартов ISO/IEC 81346 образуют гармоничную методологическую базу по классификации в строительной отрасли и рекомендуются к применению при разработке национальной классификационной системы.

По результатам анализа действующего российского законодательства в сфере градостроительной деятельности в контексте направленности на процессы информационного моделирования ОКС, учета систем классификации и классификаторов разного рода строительной информации очевидно, что основные НПА требуют актуализации для приведения в соответствие с новой редакцией ГрК РФ.

Разработана структура КСИ, отвечающая требованиям формирования и ведения ИМ ОКС на всех стадиях ЖЦ. Сформированная структура КСИ соответствует требованиям международного стандарта ISO 12006-2:2015 и отвечает требованиям масштабируемости (дальнейшего расширения) за счет добавления дополнительных КТ строительной информации при необходимости.

Определен рекомендуемый состав исходных данных (база классификации), подлежащих включению в КСИ для целей создания и ведения ИМ ОКС на всех стадиях ЖЦ ОКС. Все информационные источники соотнесены с КТ строительной информа-

ции. Часть источников (например, общероссийский классификатор строительных ресурсов ОК КСР) может быть рекомендована для прямой имплементации в состав КСИ.

Установлен состав КСИ: базовые категории строительной информации, базовые классы и связи между ними, а также соответствующие им КТ. При разработке состава КСИ были учтены национальные особенности базы нормативно-технической документации и действующего законодательства в сфере градостроительной деятельности.

Разработанная структура КСИ является универсальной и применимой на всех стадиях ЖЦ ОКС, с учетом применения технологий информационного моделирования в строительстве.

Предлагаемый состав КСИ обеспечивает охват всех видов и типов строительной информации, вне зависимости от отраслевой ориентированности. В то же время принципы организации КСИ дают возможность использовать дополнительные КТ «расширения» на уровне отдельных организаций и корпораций.

Зарубежный опыт разработки аналогичных классификатору строительной информации систем (OmniClass, Uniclass 2015, CCS и CoClass) показал необходимость вовлечения широкого круга профессионалов строительного сектора для проработки содержания КСИ. Данный подход позволит в минимальные сроки обеспечить качественное наполнение внутреннего содержания КТ.

Разработанные структура и состав КСИ позволяют:

- обеспечить единую методологию и принципы классификации для всех строительных сущностей, используемых в рамках управления ЖЦ ОКС;
- применить единые правила идентификации и кодирования элементов строительного комплекса и соответствующих им атрибутивных наборов, обеспечивающие совместимость КСИ с любыми из существующих систем классификации (общенациональными, ведомственными и корпоративными);
- реализовать индексацию и структурирование всего массива данных строительных систем, связанных с управлением ЖЦ ОКС, для однозначной идентификации используемых данных на соответствующих информационных ресурсах;
- обеспечить качественно новый уровень формирования, обработки и достоверности данных, на основании которых принимаются решения.

Дальнейшая разработка КСИ в части формирования и детализации КТ должна носить последовательный характер и базироваться прежде всего на принципах существующих международных стандартов в области КСИ с учетом практики внедрения BIM-технологий, нормативно-правовой и нормативно-технической баз строительной отрасли России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM handbook. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568
2. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта // Информационные ресурсы России. 2016. № 5 (153). С. 28–31.
3. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 65–72.
4. Шарманов В.В., Симанкина Т.Л., Мамеев А.Е. Контроль рисков строительства на основе BIM-технологий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12 (63). С. 113–124. DOI: 10.18720/CUBS.63.6
5. Чурбанов А.Е., Шамара Ю.А. Влияние технологий информационного моделирования на развитие инвестиционно-строительного процесса // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 824–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835
6. Volkov A., Chelyshkov P., Lysenko D. Information management in the application of bim in construction. stages of construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 833–837. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.251
7. Гусакова Е.А. Информационное моделирование жизненного цикла проектов высотного строительства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 14–22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22
8. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Павлов А.С., Панин А.С., Теслер Н.Д. Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 100–111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111
9. Титова И.Д., Волкодав В.А. История возникновения и развития классификаторов строительной информации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 1 (86). С. 20–29. DOI: 10.18720/CUBS.86.2
10. Edirisinghe R., London K. Comparative analysis of international and national level BIM standardization efforts and BIM adoption // Proceeding of the 32nd CIB W78 Conference. Eindhoven, The Netherlands, 2015. Pp. 149–158. URL: https://www.researchgate.net/publication/286496233_Comparative_Analysis_of_International_and_National_Level_BIM_Standardization_Efforts_and_BIM_adoption/
11. Князюк Е.М., Мирза Н.С. Применение строительных классификаторов при информационном моделировании автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 1 (8). С. 13–19. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.1.3
12. Zayton H., Safdari H. The role of interoperability in construction projects. communication and the implementation of CoClass. Master's Thesis in the Master's Programme Design and Construction project management. ACES30-2018-94. Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2018. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/256323/256323.pdf>
13. Ekholm A. A critical analysis of international standards for construction classification — results from the development of a new Swedish construction classification system // In Proc. of the 33rd CIB W78 Conference. Brisbane, Australia [5.2B], 2016. URL: https://portal.research.lu.se/portal/files/16339424/2016_10_31_Ekholm_CIB_W78_paper.pdf
14. Koch K., Chan P. Projecting an Information Infrastructure — Shaping a Community // Engineering Project Organization Conference. Colorado, 2013. URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/182975/local_182975.pdf
15. Balslev H. Implementing Model Semantics and a (MB)SE Ontology in Civil Engineering & Construction Sector // INCOSE International Symposium. 2015. Vol. 25. Issue 1. Pp. 687–696. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2015.00090.x
16. Balslev H. The Reference Designation System (RDS) a common naming convention for systems and their elements // INCOSE International Symposium. 2016. Vol. 26. Issue 1. Pp. 1639–1656. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2016.00251.x
17. Скворцов А.В. Обзор международной нормативной базы в сфере BIM // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 2 (7). С. 4–48. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.1
18. Кожара В.Л. Феномен естественной классификации. Новые идеи в научной классификации: коллектив. монография / отв. ред. Ю.И. Мирошников, М.П. Покровский. Екатеринбург : УрО РАН, 2010. Вып. 5. С. 161–189.

Поступила в редакцию 22 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 апреля 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Алексеевич Волкодав — генеральный директор; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, корп. 2, литер А, офис 4.24; РИНЦ ID: 1068607; vva@niccps.ru;

Иван Алексеевич Волкодав — кандидат технических наук, директор по науке; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, корп. 2, литер А, офис 4.24; РИНЦ ID: 574245; via@niccps.ru.

INTRODUCTION

Information technologies, viewed as an area of scientific research and a focus of practical human activities, represent one of the main drivers of economic and societal development. Over the last 20–30 years, a major share of innovations in structural design was closely related to construction data generation, storage, and presentation pursuant to the concept of building information modeling (BIM), whereby a building or a structure is analyzed as a single structured object, or “an information model” [1].

Russia, along with other countries (such as the United States, Denmark, Germany, Finland, etc.) has identified information modeling technologies as a top-priority innovative development area for the construction industry¹.

The implementation of each construction project is accompanied by an extensive amount of associated data generated throughout the entire life cycle of a construction object [2]. The project management process (as well as the management of tangible assets) is largely a data management process, which involves its storage, retrieval, transfer, and use by all persons involved in project implementation. The growing role of associated project data has caused their conversion into a digital asset.

To ensure smooth interaction between construction industry players (surveyors, designers, builders, investors, and representatives of building operators), there arises a need for a common method of presenting building information originating from a unified system of classification. In Russia, development of a building information classification system together with common BIM terminology databases is important for new approaches to the construction object’s life cycle management [3]. Classification systems are used to index and structure information about construction and investment projects (CIPs); they provide convenient data access and ensure unique identification of an information model and its composition at each stage of the life cycle of a construction facility. This feature is particularly important in the context of the project progress monitoring and risk management at various stages of its life cycle [4].

According to [5], development of in-depth mechanisms of cooperation between process participants, which is unfeasible without a unified and easy-to-comprehend project data transmission tool, represents the main development trend in the digitalized construction process that employs BIM technology platforms. Poor quality classification criteria applicable to construction objects, works, and resources causes data formats to be incompatible and limits the use of BIM during the whole life cycle of a construction object [6, 7].

Development of a nation-wide building information classifier (BIC) is the first primary step towards the effective implementation of an information modeling technology in the construction industry. It ensures state-induced control over digital processes in the course of implementing construction projects. BIC structuring and subsequent data filling are the basic functions of government-induced standardization of the construction industry².

BIC development and application will ensure generation, recognition, and processing of classifier codes with the help of specialized software solutions. The implementation of a machine-readable BIC will provide the construction industry with a universal data sharing tool available to all construction project stakeholders? It will boost the efficiency of business processes throughout the lifecycle of a construction object.

The development and use of building classifiers are the top priority actions aimed at the efficient preparation for the application of BIM technologies. However, at the moment, there are no comprehensive (integrated) building information classifiers available in Russia. There are individual classifiers of resources, machines, and products. A classifier of construction works represents a set of estimated costs and time standards [8].

There is also a need to harmonize the building information classifier which is being developed, with best international classification practices and existing standards³.

As part of an effort to develop the structure and composition of a building information classifier, engineer and maintain information models of construction objects, the Scientific and Engineering Centre for Digitalization and Design in the Construction Industry (NIC CPS) has analyzed the history of building information classifiers [9], contemporary classification systems and international standards. Several classification systems are in use worldwide. The following systems are most effective: OmniClass Construction Classification System (OCCS, USA), Uniclass 2015 (UK), CCS (Denmark), CoClass (Sweden), MasterFormat (USA), UniFormat (USA), Talo 2000 (Finland), and NS 3451&TFM (Norway). In these countries, classification systems and BIM were developed within the framework of state-induced standardization and regulation efforts [10].

The use of the US OmniClass Construction Classification System (abbreviated as OmniClass or OCCS)

¹ Passport of the Russian Federation Digital Economy National Program. URL: https://digital.ac.gov.ru/upload/iblock/219/NP_Cifrovaya_ekonomika.docx

² The professional community supported the initiative to create a unified national system for classifying building information. URL: <https://www.faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/news-35667/>

³ Vladimir Yakushev: “Russia is working to harmonize building standards”. URL: https://www.faufcc.ru/about-us/news-55421/?sphrase_id=19905/

in the construction industry is regulated at the level of national US standards⁴.

The mission of OmniClass is to consolidate the existing national classification systems, such as MasterFormat (OmniClass, Table 22 — “Types of work”), UniFormat (OmniClass, Table 21 — “Elements”), developed by the Construction Specification Institute (CSI, Canada), and EPIC (Table 23 — “Types of products”), into a single classification system using methodological principles stipulated in ISO 12006-2⁵.

According to the official data made publicly available by OmniClass developers⁶, the classification system is based on the following principles:

- OmniClass is an open scalable standard which is available to all construction industry players;
- each OmniClass co-developer has access to any information that he needs, their interaction is based on the principles of transparency of all development processes and unrestricted access to information;
- any development and improvement of the OmniClass system is subject to the involvement of a wide range of construction industry players;
- any contribution into OmniClass is voluntary and free for all parties interested in its development and improvement;
- development and further implementation of OmniClass should be managed by the construction industry as a whole, and not by any participant or organization;
- the OmniClass system is focused on terminology and practice implemented in North America;
- OmniClass is based on International Classification Standards (ISO 12006-2:2001 and ISO 12006-3);
- OmniClass takes account of existing classification systems and any other research projects that can be used to improve it.

According to the principles set forth in ISO 12006-2:2001, any item of building information can be assigned to one of three basic categories: construction resources, construction processes and construction process results. In turn, basic categories are split into subcategories organized into a system of unique classification tables (each subcategory of building information corresponds to one or more unique classification tables).

OmniClass reproduces the structure and principles of building information classification proposed

in ISO 12006-2:2001, including its fifteen classification tables (CT) representing unique categories of building information assignable to one of three basic categories of building information:

- tables 23, 33, 34, 35 and, to a smaller extent, 36 and 41 belong to the category of construction resources;
- tables 31 and 32 classify construction processes, including the building life cycle and its stages;
- tables 11 to 22 classify construction process results.

Uniclass 2015 Unified Classification System⁷ is designated for all sectors of the UK construction industry. Uniclass 2015 has harmonized classification tables filled with classes of construction objects, from global industrial, civil, and infrastructural ones to anchor bolts and LED lamps. Uniclass 2015 is also used to structure design information applicable in CAD systems. Any item of project information can be used throughout the entire life cycle of a construction object. Seven classification tables were used for initial classification and description of principal construction process assets. As the time progressed, new classification tables were developed to add new types of information and to list project management, construction and installation assignments.

Uniclass 2015 has eleven classification tables, one for a specific category of building information. Table data can be used to perform various tasks, i.e. to develop the project budget and to write a scope of work. Tables also contain other quantitative and qualitative characteristics of a classified object throughout its life cycle.

The nature of relations between classified elements was taken into account⁷ when categories of building information (titles of classification tables) were identified. Therefore, Uniclass 2015 is applicable starting from the earliest stages of construction project implementation.

Same as in the case of OmniClass, the classification methodology underlying Uniclass 2015 is based on the principles of ISO 12006-2:2015; it largely reproduces the classification framework proposed by this standard. The facet method is used to classify the elements.

Classification tables of OmniClass and Uniclass 2015 systems, analyzed for road modeling in [11], have proven the availability of three possible methods of selecting a classification system, designated for road modeling in Russia: method one means using existing classifiers without “reinventing the wheel”; method two means development of a new classification system, and method three means a global building classification system be developed in international cooperation (in this case, construction methodologies, materials and regulations will need to be harmonized). Given the course towards harmonization of Russian standards with the best international practices, method three is also feasible.

⁷ Delany S. What is Uniclass 2015? 2017. URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-uniclass-2015>

⁴ National BIM Standard — United States Version 3. National Institute of Building Sciences buildingSMART alliance, 2015. URL: <https://nationalbimstandard.org/buildingSMART-alliance-Releases-NBIMS-US-Version-3/>

⁵ ISO 12006-2 Building construction — Organization of information about construction works — Part 2: Framework for classification

⁶ OmniClass. A strategy for Classifying the Built Environment. Introduction and User's Guide. Edition: 2.1. The Construction Specifications Institute, Inc. (CSI), 2019. URL: <https://www.csiresources.org/standards/omniclass/>

The CoClass classification system, developed in Sweden, belongs to the class of systems based on the principles of classification and information management specified in ISO/IEC 81346 international standards [12].

CoClass's mission is to develop into an alternative to the currently used through outdated Swedish building information classifier BSAB-96, to eliminate restrictions that prevent the coverage of all life cycle stages (BSAB-96 is applicable to designing and, to some extent, to construction works) and to solve problems of compatibility with technologies of information modeling and digital data representation⁸.

CoClass is primarily a government-induced initiative implemented as a top-priority measure to reduce construction industry costs. According to the research performed by the Swedish Building Center (AB Svensk Byggtjänst), the unavailability of a seamless data transfer technology (whereby information is accumulated and transmitted in its entirety at each stage of a construction project) causes an annual loss of SEK 60 billion (up to 400 billion rubles for Sweden's entire construction industry)⁹.

According to the official website⁸ of the CoClass project, developers of this classification system follow the main principles in the course of their work:

- digital data representation format: the classification system should be developed and applied exclusively in the digital (electronic) format to simplify BIM application;
- data representation universality: the classification system should encompass all aspects of the building information (the name CoClass is composed of the prefix "co" that stands for unification, sharing, and a universal approach to data representation);
- usability throughout the entire life cycle of a construction object: the classification system should be effectively applicable throughout the lifecycle of a classification object;
- international status: the classification system should be based on the methodological principles underlying international standards;
- ease of modification: the classification system should be flexible and convenient in terms of its potential modification and improvement.

The fundamental difference between CoClass and many other existing classification systems is that CoClass was originally developed as a universal language designated for digital communication between various information systems. CoClass is not available as a hard

copy or an electronic document (e.g. a spreadsheet). Access to CoClass is provided either through a specialized web service that functions as a user profile or at the program interaction level (CoClass API).

The internal structure of the classification system is represented by three categories of information: OBJECTS, PROPERTIES, and ACTIVITIES. Information designated for each category is grouped into unique classification tables: seven tables for the OBJECTS category, one table for the PROPERTIES category, and one table for the ACTIVITIES category.

Swedish Building Centre is the organization, responsible for introducing most recent changes and innovations related to the content and structure of the classification system.

CoClass is based on the principles of ISO 12006-2:2015; it implements a practical classification methodology set out in ISO/IEC 81346 [14]. The classification method applied to the construction system described here is faceted; its classification criteria are permanent.

CCS (Cuneco Classification System) is a Danish classification system that has replaced outdated DBK [15]. This system is developed by the Cuneco Competence Centre, established by the Danish government in 2011. The results of the practical implementation and use of the classification system had a substantial practical value; they were contributed into ISO 12006-2 in the course of its revision.

The CCS classification system aims to standardize the following subject areas of the construction industry [16]:

- classification and identification of building system elements;
- identification of necessary and sufficient levels of information (LOI) about classified objects at various stages of a life cycle;
- development of uniform rules for quantitative assessments of building system elements;
- identification of necessary attributes of building system elements.

The CCS classification system is similar to the Swedish CoClass classification system, including the data presentation format. The content and structure of CCS are available neither as a hard copy, nor as a spreadsheet. Its content is accessible through a specialized web service or API.

As for the internal structure of the classification system, it has six main information categories (Use of construction entities, Elements, Construction aids, Construction agents, Construction product, and Use of spaces), each is represented by classification tables (one or more).

In the process of developing the classification system CCS Cuneco was guided by the provisions of ISO 12006-2:2015.

Although the coding and classification methodology applying to certain building information categories (classification tables) is based on the principles of ISO/IEC 81346, it still has minor discrepancies [17]. Soon

⁸ CoClass — Nya generationen BSAB Klassifikation och tillämpning, Projekt BSAB 2.0, 2017. URL: <https://static.byggtjanst.se/coclass/pdf/Slutdokumentation-CoClass-v1.2-20161026.pdf>

⁹ CoClass — ett nytt digitalt språk som kan spara miljarder! Svensk Byggtjänst, 2018. URL : <https://youtu.be/WeOKJhs-fTdI/> (swe).

Cuneco plans to assure the compliance of CCS with the latest version of the standard.

The Moscow Building Classification System (MBCS) is a classifier made in Russia¹⁰. Its mission is to ensure the compliance of digital models of construction objects with the regulatory requirements at the stage of design documentation review by the expert community. MBCS has thirteen classification tables divided into four categories (sections): classifiers of a digital terrain model, classifiers of a digital object model, classifiers of resources, and auxiliary classifiers.

The Moscow Building Classification System is notable for a detailed systems approach to the classification framework, which is primarily focused on the expert review process. As a result, MBCS is not fully applicable to other stages of the life cycle of a construction object. However, MBCS can be considered as a reference classification system having a high potential for subsequent partial incorporation of data into a building information classifier.

A comprehensive review of the international legislation that governs the use of BIM [19] has proven that BIM and its implementation is hindered by the effective legal framework that does not regulate the use of BIM in terms of interaction between CIP participants. Proactive implementation of BIM systems by individual organizations does not bring any tangible synergistic effect, which is only possible through the involvement of all CIP participants, including the state.

In the context of the new BIM¹¹ implementation policy pursued by the state since 2019, pursuant to Instruction PR-1235 of 07.19.2018¹² issued by the President of the Russian Federation, which establishes several top priority tasks aimed at modernizing the construction industry and improving the quality of construction, a number of important amendments were made to the Urban Planning Code of the Russian Federation by Federal Law No. 151-FZ of June 27¹³, 2019¹⁴. These

amendments deal with the use of information modeling technologies in Russia. In particular, the law introduced the concepts of an information model of a capital construction object and a building information classifier, or an information resource that distributes information about capital construction objects and any other data associated with them in accordance with its classification (classes, groups, types, and other features).

MATERIALS AND METHODS

When preparing the article, we analyzed the following international building information classification systems: OmniClass (USA), Uniclass 2015 (Great Britain), CCS (Denmark), and CoClass (Sweden), that are widely used by the construction industry. In addition to international classification systems, we also examined domestic classifiers, including a classifier of building resources, a classifier of capital construction objects subject to their function, functional and technological processes, and the Moscow Building Classification System (MBCS). A comparative analysis of structures, compositions, and fundamental methodologies associated with classification systems in question has been performed to develop the requirements applicable to the structure and composition of a Russian building information classifier.

The co-authors have taken advantage of the relevant materials provided by the leading Russian and foreign industry experts, ministries, and departments. The analysis of the Russian regulatory and technical framework of information modeling in the construction industry has been performed.

The co-authors used the systems approach, the comparative analysis, and generalization. Empirical (description, comparison) and theoretical (formalization, or construction of abstract mathematical models that can identify the essence of the processes in question) research methods were applied to draft the article.

RESULTS

The criteria, listed in Table 1, were used to analyze the most popular foreign classification systems and to develop the structure and composition of a building information classifier.

Each national classification system, which is currently in use, is based on the classification principles specified in ISO 12006-2. CoClass and CCS are also governed by ISO/IEC 81346.

ISO/IEC 81346 standards (and classification systems developed on their basis) propose a method for transition from the artificial classification to the natural one. This method originates from the application of permanently (internally) inherent common and permanent attributes that define many other similar properties of these objects. According to [20], natural classification depicts the origin of things, and it is considered to be

¹⁰ Classifiers for information modeling. Description of the system. Edition 4.0. Moscow, 2019. URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/1115/00_Opisanie_MSSK_40.pdf

¹¹ The concept of implementing a life-cycle management system for capital construction objects using information modeling technologies in the Russian Federation. URL: <https://www.faufcc.ru/cifrovoe-razvitie/bim/kontsepciya/Kontsepciya.pdf/>

¹² The order of the President of the Russian Federation of July 19, 2018 No. Pr-1235. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550966183/>

¹³ Federal Law dated June 27, 2019 No. 151-FZ “On Amending the Federal Law “On Participation in the Shared Construction of Apartment Buildings and Other Real Estate Objects and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation” and Certain Legislative Acts of the Russian Federation”.

¹⁴ The Town Planning Code of the Russian Federation of December 29, 2004, No. 190-FZ (as amended, relevant from August 13, 2019).

Table 1. National classification systems

Criterion	OmniClass	Uniclass 2015	CoClass	CCS
Developer state	USA, Canada	UK	Sweden	Denmark
Year of initial standard revision	2006	2015	2016	2012
Classification system coverage	All construction operations, overall life cycle of a construction object	All construction operations, overall life cycle of a construction object	All construction operations, overall life cycle of a construction object	All construction operations, overall life cycle of a construction object
Preceding classification systems	MasterFormat, UniFormat, EPIC	SfB (1950) Uniclass (1997) Uniclass 2 (2013)	SfB (1950) BSAB 96	BC/SfB (1950) DBK (2006)
Vertically expandable classification system	+	+	–	–
	Introduction of additional hierarchy levels	Introduction of additional hierarchy levels	ISO 81346 classification principles imply no need for vertical scaling	No need for vertical scaling
Horizontally expandable classification system	+	+	+	+
	Introduction of intermediate digital codes	Introduction of intermediate digital codes	Additional letters and reserved classes	Additional letters and reserved classes
Feasibility of integration of other classification systems	–	–	As a property of a classification object	As a property of a classification object
Integrated classification systems	MasterFormat, UniFormat, EPIC	–	–	–
Classification legislation	ISO 12006-2:2001 ISO 12006-3	ISO 12006-2:2015 (partially)	ISO 12006-2:2015 ISO 12006-3 ISO/IEC 81346-2 ISO 81346-12	ISO 12006-2:2015 ISO 12006-3 ISO/IEC 81346-2 ISO 81346-12
Classification method	Faceted	Faceted	Faceted with a permanent classification basis	Faceted with a permanent classification basis
Number of classification categories (classification tables)	15	11	9	9
Maximal level of hierarchical nesting of classification tables	7	4	3 + 1	3
Classifier code generation standard	–	–	ISO 81346-1, ISO 81346-12	ISO 81346-1, ISO 81346-12
Classifier code example	32-49 51 13 11	Pr_15_31_04_86	UAA	QQC
Classification aspects of the identification code	–	–	Function-ID Product-ID Location-ID Type-ID	Function-ID Product-ID Multi-level product-ID Location-ID Type-ID Multi-level type-ID
Presentation format	Spreadsheets	Web service	Web service	Web service
API	–	NBS BIM Toolkit API	CoClass API	Cuneco CCS service web API

“genetic”. All other classification criteria are disregarded in respect of classified objects; they represent attributes (or properties) inherent in these objects but not involved in the classification. These attributes can change throughout the life cycle of a classified object. However, their change does not affect the classification basis; therefore, the object can have an unchanged identifier of the classification code throughout the entire life cycle.

Let us compare classification approaches implemented by various systems using the “door” as an example.

In the Products classification table of OmniClass (Table 23), the object “Door” can be classified using one of 120 options. Table 2 shows subclasses of the 1st classification level for the object “Door” (23-17 11 00).

Thus, all 120 subclasses of the object “Door” within the same hierarchical level (23-17 11 00) are classified according to one of three different attributes: door material, door function, door construction principle. This means that, for example, the object “Metal Fire Control Door” can have three different classification codes: 23-17 11 13 (Metal Doors), 23-17 11 31 (Fire Doors) и 23-17 11 37 (Controlled Environment Doors). Such cases of ambiguity in the assignment of the identifier code within a classifier are a serious obstacle to the use of such classification systems at the level of program interaction of information systems throughout the life cycle of a construction object.

In terms of information management processes, such classification principles cause another undesirable effect: the classifier code (acting as an identifier) converts into a variable property if the characteristics (properties) of a classification object change (e.g. in the

course of object operation), which is contrary to the invariability requirement applicable to identification codes of classification objects at all stages of the life cycle of a construction object.

In the Danish CCS system, the object “Door” (classification table “Components”) can be classified in one way (QQC) as opposed to 120 possible ways demonstrated by the OmniClass classification system (Table 3). The object “Door” refers to the technical system “Wall Construction” (AD) and the functional system “Wall System” (B).

The identification code of the object “Metal Fire Control Door” (as well as the object “Glass Traffic Door”) can be written in the form [E]=B.AD.QQC001, with regard for the functional aspect (the “=” symbol in the code), and it remains unchanged throughout the life cycle of the object “Door”, since this code demonstrates the essence of the object.

Table 3. Classification of the object “Door” according to the Components classification table

Code	Class name
Q_	Opening and closing component
QQ_	Access granting component
QQC	Door

Other properties of the object “Door” (material, design, special designation) are added to its characteristics and can be determined by separate classification tables (e.g. Properties in CoClass). Such a classification system has every reason to be called a natural classification system based on permanent features of objects

Table 2. First level subclasses of the object “Door” in the OmniClass system

Code	Class name	Classification criterion
23-17 11 13	Metal Doors	Door material
23-17 11 15	Wooden Doors	
23-17 11 17	Plastic Doors	
23-17 11 17	Composite Doors	
23-17 11 21	Glass Doors	
23-17 11 27	Access Doors	Functional purpose of the door
23-17 11 31	Fire Doors	
23-17 11 37	Controlled Environment Doors	Functional purpose of the door
23-17 11 39	Prison Doors	Functional purpose of the door
23-17 11 41	Bifold Doors	Door construction principle
23-17 11 43	Lightproof Doors	
23-17 11 45	Traffic Doors	
23-17 11 47	Pressure Resistance Doors	Functional purpose of the door
23-17 11 49	Security Doors	

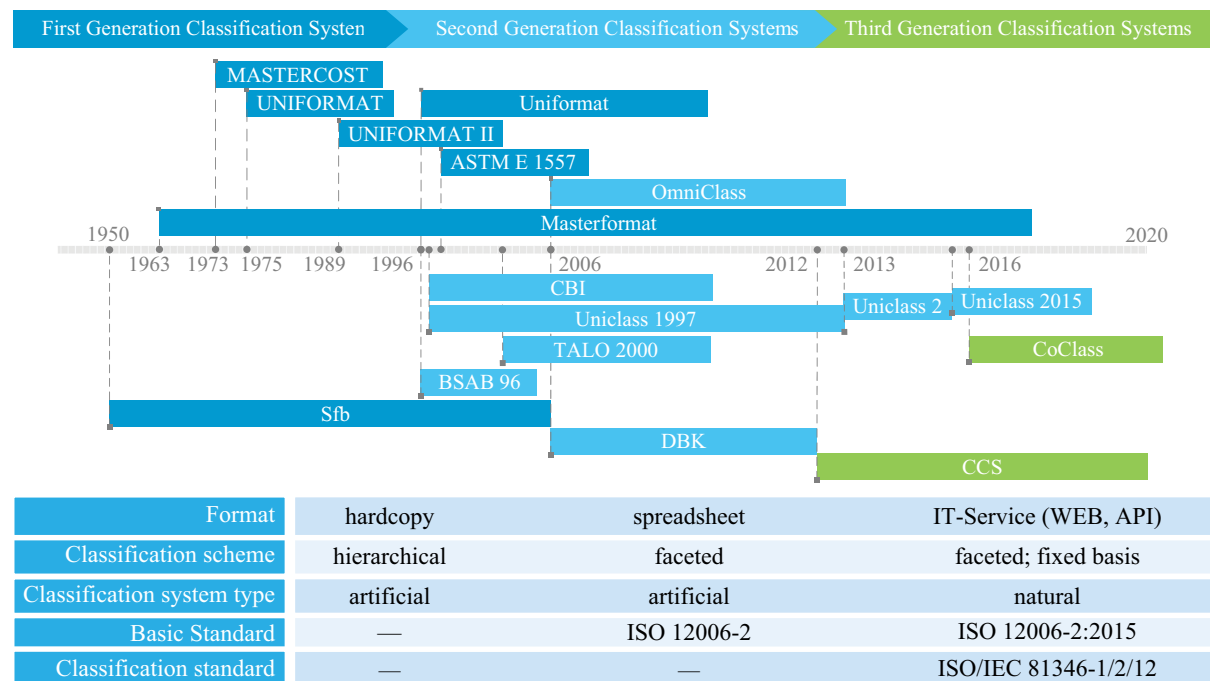


Fig. 1. Three generations of classification systems in the construction industry

that make up the essence of the classified object and represent its designation. According to [20], the closer these objects are to each other “genetically”, the more similar their properties are and the less they differ from one another. As a result, the structure and composition of classification tables in CCS and CoClass classification systems are radically different from the structure and composition of tables in OmniClass and Uniclass 2015. Table 4 shows quantitative parameters of taxonomies for OmniClass, Uniclass 2015, CCS, and CoClass.

Table 4. Taxonomies of classification tables in different classification systems

Classification system name	Classification table	Number of classes	Maximal level of hierarchical nesting
OmniClass	Table 23 Products	6887	7
Uniclass 2015	Pr — Products	7210	4
CCS, CoClass	Components	750	3

According to Table 4, we can conclude that the mission of the classification methodology formulated in ISO/IEC 4 is to formulate simple and user-friendly classification structures based on the principles of data representation universality, minimization, and regularity of classification features originating from inherent attributes of classification objects (natural classification basis). These principles facilitate the development of natural classification systems.

Following the comparison of classification systems performed within the framework of the present and earlier studies¹⁵, the co-authors suggest dividing all classification systems designed for the construction industry (depending on features of their organization) into three basic categories, or generations (Fig. 1):

- classification systems-ancestors, or the first generation;
- classification systems based on ISO 12006-2:2001 and ISO 12006-2:2015, or the second generation;
- classification systems based on ISO 12006-2:2015 and ISO/IEC 81346, or the third generation (digital classification systems based on natural classification principles).

Principles of classification and internal structuration of a future building information classifier should be based on the best practice in the development and application of existing classification systems. The following basic requirements were set up in the course of developing the structure and composition of a building information classifier:

- permanence of codes attributed to all elements of construction information throughout the life cycle of a construction object;
- uniqueness of codes (each element must have its own unique code within the project);

¹⁵ Common approaches to organizing information to ensure the life cycle management of buildings and structures using information modeling and development of a methodology for classifying building information. URL: https://www.faufcc.ru/cifrovoe-razviti/bim/klassifikator/Презентация_НИИ_ЦПС_v3_005.pdf

- unambiguous classification criteria (classification should not contain such classes as “others”, “not included” or “various”, i.e., classes that cannot be clearly defined);
- completeness of information about model components (the code should indicate that the component belongs to a particular system, equipment class, location, location hierarchy, etc.);
- expandable data entries (without re-encoding), representing classified objects in case of emergence of new materials, works, roles, technologies, etc.;
- independence of the coding language from the national language to ensure international usability of the classifier;
- data exchangeability between the building information classifier and other classification systems widely used worldwide.

Within the framework of the study, the co-authors also analyzed several principal effective regulatory acts governing urban development in terms of the analysis of the life cycle of a construction object, their focus on information modeling processes of CCO, and regard for classification systems and classifiers of various types of construction information.

Definitions and provisions important for information modeling in the construction industry were introduced into the Urban Planning Code by virtue of Article 5, Federal Law No. 151-FZ of June 27, 2019. New definitions and provisions ensure the integration of concepts (terms) of information modeling and building information classifiers into urban planning activities in the Russian Federation:

- some requirements and provisions of the Civil Code of the Russian Federation dealing with information modeling and building information classifiers come into force in 2020 and 2022, as part of an effort to implement the Concept for the management of life cycles of construction objects using information modeling in the Russian Federation, namely, development of information models and requirements for information modeling of construction objects;
- the information model of a construction object will serve as an annex to or even as an equivalent of the project documentation;
- a building information classifier is an integral (mandatory) resource used to generate and maintain information models of construction objects according to its definition (Article 57⁶ Part 1) and arrangements for use (Article 57⁶ Part 2);
- given that the provisions of Civil Code of the Russian Federation apply to the whole life cycle of a construction object, the structure and composition of a building information classifier must ensure the generation and maintenance of an information model of a construction object throughout its life cycle;
- Part 1 of Article 57⁵ of the Civil Code of the Russian Federation introduces the definition of a person responsible for the generation and maintenance of in-

formation models of construction objects, including the developer, the technical customer, the person providing or preparing the due diligence, and (or) the person responsible for the operation of construction objects. This provision ensures responsibility sharing and work distribution among parties to the construction project.

The analysis of Decrees No. 20 dated January 19¹⁶, 2006¹⁷, No. 87, dated February 16¹⁸, 2008, and No. 145, dated March 5, 2007, issued by the Government of the Russian Federation, has substantiated the following statements.

Decree No. 20 issued by the Government of the Russian Federation on January 19, 2006 has no requirements or provisions concerning information modeling of construction objects or building information classifiers. Obviously, Part 6 of Provisions on the implementation of engineering surveys pursuant to Decree No. 20 issued by the Government of the Russian Federation on January 19, 2006, should be updated to comply with Part 4² Article 47 of the Urban Planning Code of the Russian Federation in respect of the supplement focused on the preparation of results of engineering surveys in the form that makes them usable for the generation and maintenance of an information model;

Decree No. 87 does not have any requirements concerning the application of information models of construction objects or construction information classifiers. As for the project documentation format, only textual and graphic forms are specified there.

Following the amendments to paragraph 12 of Article 48 of the Civil Code of the Russian Federation introduced by Federal Law No. 342-FZ of August 3, 2018, that came into effect on July 1, 2019, project documentation sections of Decree No. 87 need updating to ensure their compliance with the Urban Planning Code of the Russian Federation. On the opposite, Decree No. 87 in its current form is based on the documentation approach while the use of BIM is based on the data approach. In other words, design decisions (formalized by information modeling methods), rather than project documentation, are primarily subject to further development and examination.

¹⁶ Decree of the Government of the Russian Federation of January 19, 2006, No. 20 “On engineering surveys for the preparation of design documentation, construction, reconstruction of capital construction facilities” (as amended on July 2, 2019), 2006.

¹⁷ Decree of the Government of the Russian Federation of March 5, 2007, No. 145 “On the procedure for organizing and conducting a state examination of project documentation and engineering survey results” (as amended on November 2, 2018), 2007.

¹⁸ Decree of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008, No. 87 “On the composition of sections of project documentation and requirements for their maintenance” (as amended on July 17, 2019), 2008.

Obviously, the structure and composition of the requirements comprising Provisions based on Decree No. 87 should be radically revised in the course of enacting the Concept for the management of life cycles of construction objects using information modeling in the Russian Federation.

Provisions developed in furtherance of Decree No. 145 have no obligatory application of information modeling of construction objects or building information classifiers. As for the format of the project documentation and/or engineering survey results specified in paragraph (L), Part 2 of Provisions, starting from January 1, 2017, only electronic format is authorized, except when project documentation and/or engineering survey results contain a state secret.

Although Provisions developed in furtherance of Decree No. 145 ensure transition to electronic document management unlike Provisions concerning the composition and content of the project documentation, they refer to the same set of documents to be prepared in the electronic format (e.g. pdf).

If the government changes its policy in respect of BIM, an information model of a construction object

(rather than project documentation) will be analyzed and revised in furtherance of expert opinions, and this workflow pattern will be feasible if the set of requirements, applicable to information models, attributes and detailing, is available.

Any transition to the digital examination of construction project documentation requires BIM based design to be accompanied by revisions in the regulatory framework (including the revision of Decree No. 87 and new technical specifications), automated recording of project documentation changes made by experts, and implementation of management systems applicable to requirements and configurations.

A consolidated list of requirements applicable to the structure and composition of a future classifier of building information is compiled on the basis of the analysis of foreign classification systems, international standards in the field of classification of building information, analysis of effective Russian urban planning laws and regulations, existing Russian classifiers and construction classification systems (Table 5).

Table 5. Requirements applicable to the structure and composition of a building information classifier

Requirement No.	Text of the requirement
1	The classifier must be focused on combining and unifying existing classifiers and classification systems
2	The classifier must represent an open standard, its content must be expandable (scalable)
3	Representatives of the civil engineering community must make contributions into the content of the building information classifier
4	A government entity shall be responsible for the development, maintenance, and further improvement of the building information classifier
5	The building information classifier should be based on international standards
6	Any classifier to be developed shall take account of the development and operation of existing construction classification standards
7	Classification tables of the building information classifier must have a system of statuses ("under development", "project", "issued", etc.)
8	The building information classifier shall be universal, it shall apply to civil engineering, industrial and infrastructural objects, etc.
9	The building information classifier must be applicable throughout the entire life cycle of construction objects
10	The building information classifier must be compatible with information modeling technologies in civil engineering
11	The building information classifier must have a flexible and scalable structure, its structure and composition shall be changeable
12	The structure of the building information classifier to be developed shall be based on the regulatory provisions of ISO 12006-2:2015
13	The developed structure of the building information classifier must be displayed in graphic form using information models EXPRESS-G
14	Classification tables (construction subject areas) of the building information classifier must have unique identifier codes to ensure the unambiguous attribution of information classes to specific construction areas (classification tables)

End of Table 5

Requirement No.	Text of the requirement
15	The structure of the building information classifier must be based on the principles of ISO 12006-2:2015
16	The tabular style of the building information classifier (classification and grouping methodology) must be based on the principles of ISO/IEC 81346
17	The structure of the building information classifier must be universal and it must contain classification tables and classes used throughout the life cycles of construction objects
18	Structural principles of the building information classifier must ensure integration of existing classifiers (state-owned and private ones) into BIC
19	BIC coding principles should enable generation of universal codes for classified objects that remain unchanged throughout their life cycle
20	The building information classifier must be integrated into information systems focused on information modeling and involved in the implementation of construction projects
21	The building information classifier must contain information on building elements, building characteristics, construction objects, stages of their life cycle, and construction products

Based on the above requirements, the Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction has designed the structure and composition of the building information classifier.

The building information classifier has separate classes of building information, distributed among basic categories of information, and combined through simulated relations (or links). According to ISO 12006-2:2015, all building information classes and classification tables belong to one of four basic categories of building information (resource, process, result, and property).

Basic categories of building information serve to simulate the basic process characteristic of the construction sector: obtaining a certain specific result is a direct consequence of several interactions with some construction resources. Resource, processes, and results have a number of universal or specific properties (Fig. 2). This configuration of relations between basic categories of building information is universal and it is maintained throughout the life cycles of construction objects.

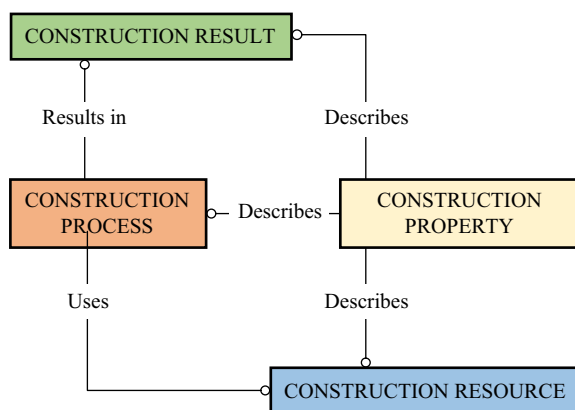


Fig. 2. Relations between basic categories of building information

Each basic category (construction process, construction resource, construction result, construction property) is split into several separate classes of building information that belong to it. Each class of building information has its own classification table. One classification table can correspond to several basic classes of building information. The proposed composition of the building information classifier is presented in Table 6.

To unambiguously identify classes of building information, each classification table is assigned a unique three-letter code, which is an abbreviation of the words that appear in the name of the corresponding classification table (e.g. CPR stands for “Construction Products” and LCS stands for “Life cycle stages of construction objects”). Classification table codes also have alternative variants compiled of Latin letters.

Basic classes of building information are interrelated. These relations enable us to model interrelations between different classes by adding supplementary fields to the classification table body.

For example, classification table No. 21 “Construction properties” contains classes demonstrating properties of classes of Table No. 6 “Components”. Accordingly, the addition of the “Component Code” field in the “Construction properties” classification table will make it possible to establish a one-on-one correspondence between a component and its properties. Variations of relations between basic categories and classes are provided in Table 7.

A model structure of the building information classifier in EXPRESS-G notation (Fig. 3) was developed with account for the basic categories of building information (Fig. 2), basic classes (Table 6), and potential relations between them (Table 7).

Sources of information were distributed among classification tables of building information classifiers in an effort to compile the content of the classification

Table 6. Building information classifier. Composition

Basic category of building information	Basic class of building information	CT number	CT code	CT name
Construction result	Zone	1	RZo	Rooms and zones
	Room			
	Complex of construction objects	2	CCo	Complexes of construction objects
	Construction object	3	CEn	Construction objects
	Functional system	4	FnS	Functional systems
	Technical system	5	TeS	Technical systems
	Component	6	Com	Components
Construction process	Management	7	Mng	Process management
	CCO life cycle stage	8	LCS	Life cycle of construction objects
	Engineering investigation process	9	PER	Engineering investigation processes
	Design process	10	PDe	Design processes
	Building process	11	PCo	Building processes
	Maintenance process	12	PMn	Maintenance processes
	Reconstruction process	13	PRe	Reconstruction processes
	Major repairs process	14	PRf	Major repairs processes
	Building or structure demolition process	15	PUt	Building or structure demolition processes
Construction resource	Construction product	16	CPr	Construction products
	Construction material	17	CMa	Construction materials
	Construction aid	18	ARe	Construction aids
	Construction agent	19	Hre	Construction agents
	Construction information	20	Inf	Construction information
Construction property	Construction property	21	Prp	Construction properties

Table 7. Relations between basic classes of building information

Basic class (category) of building information (subject)	Type of relation	Basic class (category) of building information (object)
Room	May be part of	Zone
	Type of	Built space
Zone	Type of	Built space
Built space (abstract class)	Type of	Construction result
	Defined by	Construction result
Construction result	Presented as	Construction information
Complex of construction objects	Type of	Construction result
	Aggregate of	Construction object
Construction object	Type of	Construction result
Construction element (abstract class)	Type of	Construction result
	Part of	Construction object

End of Table 7

Basic class (category) of building information (subject)	Type of relation	Basic class (category) of building information (object)
Component	Type of	Construction element
	Part of	Technical system
	May be part of	Component
Technical system	Part of	Functional system
	Type of	Construction element
	May be part of	Technical system
Functional system	Type of	Construction element
Construction process	Results in	Construction result
	Uses	Construction resource
	Occurs during	CCO life cycle stage
Process management	Part of	Construction process
	Controls	Construction process
Engineering process	Type of	Construction process
Design process	Type of	Construction process
Construction process	Type of	Construction process
Operation process	Type of	Construction process
Reconstruction process	Type of	Construction process
Refurbishment process	Type of	Construction process
Process of demolishing a building or structure	Type of	Construction process
Construction property	Describes	Construction result
	Describes	Construction process
	Describes	Construction resource
Construction product	Type of	Construction resource
	Made of	Construction material
Construction material	Type of	Construction resource
Construction aid	Type of	Construction resource
Human resource	Type of	Construction resource
Construction information	Type of	Construction resource

table (Table 8) on the basis of the proposed structure and composition of building information classifiers and with regard for the information designated for classification.

CONCLUSIONS

Full-scale implementation of information modeling technologies at all stages of life cycles of capital construction objects implies effective and seamless management of information about construction objects. Effective information management is determined, first

of all, by its structuredness, coherence, unambiguity of interpretation, and employment of building information classification systems.

Development of a national classifier of building information is the first step towards introduction and application of information modeling technologies in the construction industry. Full-scale implementation of classification systems launches the application of a universal and unambiguously interpreted communication language used by all parties to construction projects (a condition of “machine-readability”).

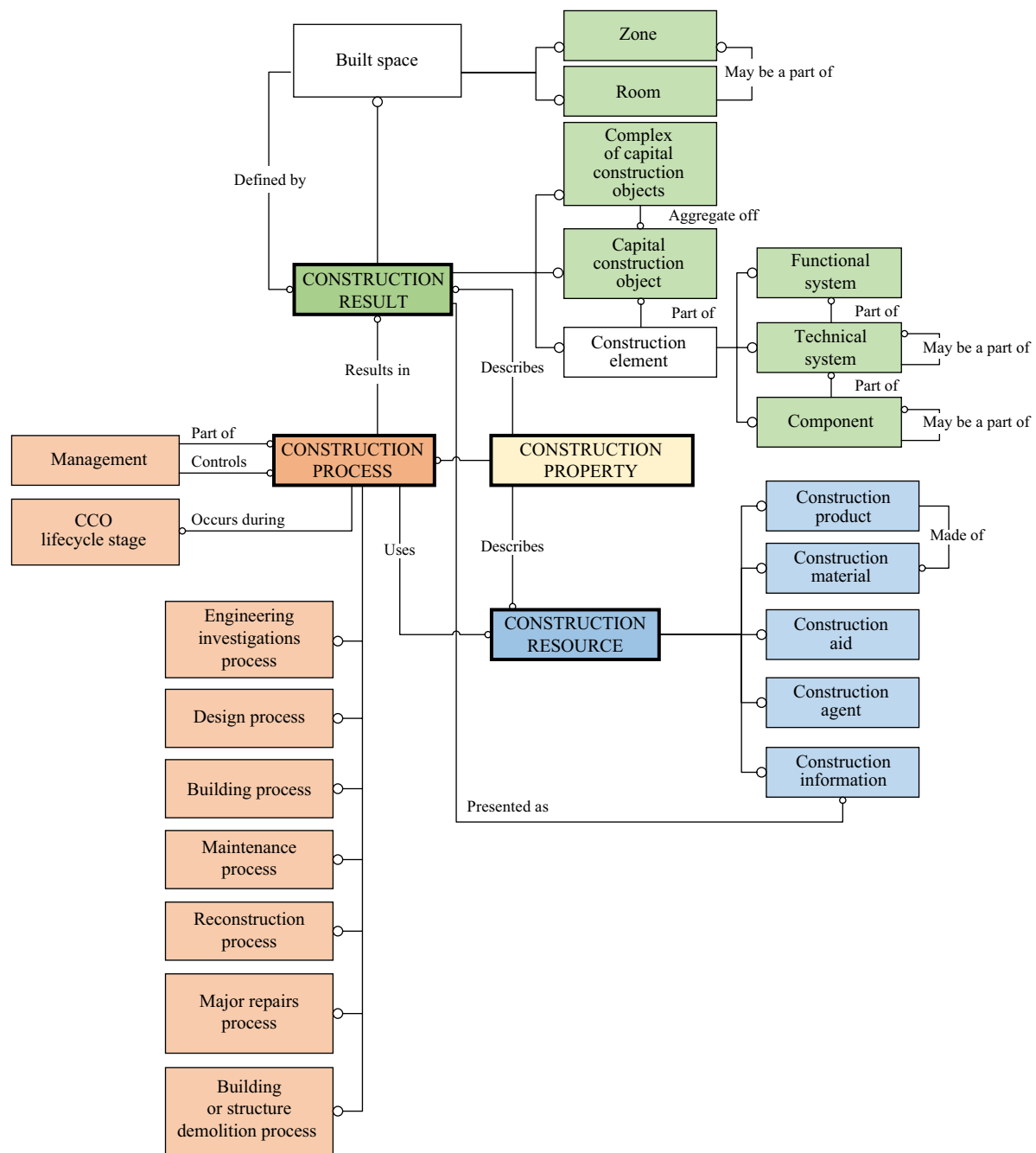


Fig. 3. Basic categories, classes of building information and their relations in EXPRESS-G notation¹⁹

¹⁹ Text boxes indicate individual categories of building information. Non-coloured boxes (for example, “Built space”, “Construction element”) mean abstract classes, i.e. classes of building information introduced to generalize classes, or heirs, that have no individual implementation (lack of classification tables corresponding to them). Coloured boxes having a thick line frame indicate basic categories of building information (“Construction result”, “Construction process”, “Construction resource”, “Construction properties”). Coloured boxes having a thin line frame indicate classes of building information (“Functional system”, “Component”, etc.) implemented in classification tables of building information (“Functional systems”, “Components”, etc.). Connecting lines represent relations between classes and categories. A thick line with a circle at the end stands for a “type-of” relation, thin lines with circles at the end stand for other types of relations, types of relation are determined by notations next to connection lines.

Table 8. Distribution of classified information among classification tables

CT number	CT code	CT name	Information sources analyzed with the purpose of integration into CT / Reference CT of existing classification systems
1	RZo	Rooms and zones	Sources of information: - Regulatory and technical base of the construction industry - IEC 81346-2:2019 Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 2: Classification of objects and codes for classes CT structure: - IEC 81346-2:2019, Table 4 Reference CT: - Uniclass 2015 — Spaces / locations - OmniClass — Table 13 Spaces by functions - OmniClass — Table 14 Spaces by form - CoClass — UT Built space - CCS — Use of spaces - MBCS — Rooms and zones
2	CCo	Complexes of capital construction objects	Sources of information: - Classifier of capital construction objects according to their purpose, functional and technological processes (Federal Autonomous Institution “Federal Department of State Expertise”) - OKOF 2 — All-Russian Classifier of Fixed Assets
3	CEn	Capital construction objects	Reference CT: - CoClass — BX Construction complex - CCS — Use of Construction Entities - Uniclass 2015 — Co Complexes - Uniclass 2015 — En Entities - Uniclass 2015 — Ac Activities - OmniClass — Table 11 Construction entities by function - OmniClass — Table 12 Construction entities by form - MBCS — Types and purpose of CCO
4	FnS	Functional systems	Sources of information: - Regulatory and technical base of the construction industry (Government Decree No. 1521) - ISO/IEC 81346-12:2018, A.1, A.2
5	TeS	Technical systems	CT structure: - ISO/IEC 81346-12:2018 Industrials systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 12: Construction works Reference CT: - CCS \ CoClass — Technical Systems - CCS \ CoClass — Functional Systems - MBCS-Systems - Uniclass 2015 — Ss Systems 07
6	Com	Components	Sources of information: - Regulatory and technical base of the construction industry (Government Decree No. 1521) - IEC 81346-2:2019, Table 3 CT structure: - IEC 81346-2:2019, Table 3 Reference CT: - OmniClass — Table 23 Products - OmniClass — Table 21 Elements - Uniclass 2015 — Pr Products - Uniclass 2015 — EF Elements / functions - CoClass — KO Components - CCS — Components - MBCS — Elements

CT number	CT code	CT name	Information sources analyzed with the purpose of integration into CT / Reference CT of existing classification systems
7	Mng	Process management	Sources of information: - GOST R ISO 21500-2014 Project Management Guide - GOST R ISO 10006-2005 Quality Management Systems. Design Quality Management Guide - PMBOK (Project management Body of Knowledge) - ICB (IPMA Competence Baseline) Reference CT: - OmniClass — Table 32 Services - Uniclass 2015 — PM Project Management - MBCS — Information management
8	LCS	Life cycle stages of capital construction objects	Sources of information: - Federal Law No. 384-FZ “Technical Regulations of Safety of Buildings and Structures” dated December 30, 2009. Reference CT: - OmniClass — Table 31 Phases
9	PER	Engineering investigation processes	Sources of information: - effective Russian legislation in the area of urban development - regulatory and technical base in the construction industry (in terms of processes underway throughout the life cycles of capital construction objects) - OKVED 2 — Section F. Construction - OKPD 2 — All-Russian classification of products by types of activity (Section F — Structures and construction works) - GESN-2001 — General Construction Work - GESNr-2001 — Repair Work - GESNm-2001 — Installation work - GESNmr-20014 — Overhaul of equipment - GESNp-2001 — Commissioning Reference CT: - OmniClass — Table 22 Work results - CoClass — PR Work result - CoClass — FA Maintenance activities
10	PDe	Design processes	
11	PCo	Building processes	
12	PMn	Maintenance processes	
13	PRe	Reconstruction processes	
14	PRf	Major repairs processes	
15	PUt	Building or structure demolition processes	
16	CPr	Construction products	Sources of information: - OK KSR — Classifier of construction resources, namely: - Book 05 — Concrete, cement, gypsum products - Book 06 — Ceramic construction products - Book 07 — Steel structures and their parts made of ferrous metals - Book 08 — Metal products, rolled metal products, metal wire ropes - Book 09 — Steel structures and their parts made of aluminum and aluminum alloys - Book 10 — Rolled and drawn non-ferrous metal products and non-ferrous metals - Book 11 — Products and structures made of wood and plastic extrusions - Book 13 — Natural stone products - Book 15 — Landscape architecture products - Book 21 — Cable products - Book 23 — Pipes and pipelines, fittings, adapting pipes, metal fittings - Book 24 — Pipes and pipelines, fittings, adapting pipes, fittings made of materials other than concrete - Book 61 — Electronic equipment and communication devices for broadcasting, television, fire and security alarms - Book 62 — Electrical equipment and devices - Book 63 — Equipment and devices for heat supply systems - Book 64 — Equipment and devices for ventilation and air conditioning systems

Continuation of the Table 8

CT number	CT code	CT name	Information sources analyzed with the purpose of integration into CT / Reference CT of existing classification systems
			• Book 65 — Equipment and devices for water supply and sewage systems • Book 66 — Equipment and devices for gas supply systems • Book 67 — Lifts • Book 68 — Pumps and pumping stations for pumping liquids • Book 69 — Power-driven pipe fittings and valves • Book 77 — Railway construction equipment • Book 79 — Nuclear power plant equipment for construction of nuclear facilities FSNB-2001 materials: • Part 2. Engineering constructions and products • Part 4. Concrete, reinforced concrete and ceramic products. Non-metallic materials. Ready-mixed concrete and mortar • OK ESKD — All-Russian Classifier of Products and Design Documents Reference CT: • OmniClass — Table 23 Products • Uniclass 2015 — Pr Products • MBCS — Construction products and materials
17	CMa	Construction materials	Sources of information: • OK KSR — Classifier of construction resources, namely: • Book 12 — Roll roofing, waterproofing, heat insulating, sound-proofing, tiling materials and products • Book 14 — Paint-and-lacquer anticorrosive materials, protective and similar coatings, glues • Book 16 — Materials for landscape gardening and green building • Book 17 — Refractory materials and products • Book 18 — Materials and products for water supply, sewage, heat supply, gas supply systems • Book 19 — Materials and products for ventilation and air conditioning systems • Book 20 — Installation and wiring materials, products and constructions • Book 22 — Materials for communication, broadcasting and television systems and structures • Book 25 — Railway construction materials • Book 26 — Materials and products for subways and tunnels • Book 27 — Materials and products for environmentally friendly transport networks FSNB-2001 materials: • Part 1. Materials for general construction works • Part 3. Plumbing materials and products • Part 5. Materials, products and structures for installation and specialized construction works Reference CT: • OmniClass — Table 41 Materials • MBCS — Construction products and materials
18	ARe	Supplementary resources	Sources of information: • OK KSR — Classifier of construction resources, namely: • Book 91 — Machinery and mechanisms • Machinery and mechanisms FSNB-2001 Reference sources: • OmniClass — Table 35 Tools • Uniclass 2015 — TE Tools and Equipment • CCS — Constructions aids components • CCS — Construction aids functional systems • MBCS — Construction machinery and equipment

CT number	CT code	CT name	Information sources analyzed with the purpose of integration into CT / Reference CT of existing classification systems
19	HRe	Personnel	Sources of information: • OKPDTR — Russian national classifier of occupations of employees, positions of civil servants and wage categories • ETKS — Unified rating and skills guide for jobs and occupations of manual workers Reference sources: • OmniClass — Table 33 Products • OmniClass 34 — Organization roles • CCS — Construction agents
20	Inf	Information	Sources of information: • OKUD — Russian classifier of management documentation Reference sources: • OmniClass — Table 36 Information • Uniclass 2015 — Fi Forms of information • Uniclass 2015 — Zz CAD • MBCS — Information management
21	Prp	Characteristics	Sources of information: • Effective Russian legislation in the field of urban development • Regulatory and technical base in the construction industry Reference sources: • OmniClass — Table 49 Properties • CoClass — Property • CCS — Classes of properties • MBCS — Parameters

The analysis of international classifiers of building information (OmniClass, Uniclass 2015, CCS, Co-Class) has proven that third generation classification systems, which can also be called “digital”, are the most technologically and methodologically advanced ones. Danish CCS and Swedish CoClass systems are best-in-class.

ISO 12006-2:2015 and ISO/IEC 81346 serve as the harmonious methodological framework for information classification in the construction industry; they are recommended as the framework of a national classification system.

Obviously, principal legal acts need to be revised to ensure compliance with the new version of the Urban Planning Code of the Russian Federation. This conclusion has been substantiated by the analysis of the effective legislation governing urban development and information modeling of construction objects with regard for versatile classification systems and building information classifiers.

The structure of the building information classifier has been developed; it complies with the requirements applicable to the generation and maintenance of information models of construction objects at each stage of their life cycle. The structure of the newly developed classifier complies with ISO 12006-2:2015. The proposed building information classifier complies with scalability requirements, as supplementary classification tables can be added to it if necessary.

The composition of the inflow data to be entered into BIC for the purpose of generating and maintaining information models of construction objects at each stage of their life cycle has been determined. All sources of information are correlated with building information classification tables. Some sources (for example, the All-Russian classifier of construction resources, OK KSR) can be recommended for immediate integration into the classifier of building information.

The composition of the classifier has been determined: it has several basic categories of building information, basic classes and relations between them, as well as classification tables. Effective urban planning legislation, national regulatory and technical specifications govern the development of the building information classifier.

The structure of the building information classifier is universal; it is applicable at each stage of the life cycle of a construction object and it takes advantage of information modeling technologies designated for the construction industry.

The building information classifier encompasses all types of construction information, regardless of the industry focus. At the same time, its organizational principles support new classification tables contributed by independent organizations and corporations.

The history of international building information classifiers (OmniClass, Uniclass 2015, CCS, and CoClass) has proven the need to have a wide range

of professionals involved in the elaboration of the BIC content. This approach will ensure high quality content of classification tables in the short term.

The structure and composition of the building information classifier will ensure:

- unified methodological and classification principles applicable to all construction entities used to manage the life cycle of construction objects;
- uniform rules used to identify and code elements of construction complexes and sets of their attributes for BIC to be compatible with any of the existing classification systems (at national, industry-wide and corporate levels);

- indexing and structuring of the entire data array related to the management of CCO life cycles aimed at the unambiguous identification of data contributed into information resources;

- a qualitatively higher standard of generation, processing, and reliability of the data that will serve as the basis for decision making.

Any further development of construction information classifiers in terms of generation and refinement of classification tables must be consistently performed in accordance with the principles of international standards of building information classification, BIM practice, regulatory and technical frameworks governing the Russian construction industry.

REFERENCES

1. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. *BIM handbook*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568.
2. Ginsburg A.V. BIM-technologies in the process of life cycle of construction projects. *Information Resources of Russia*. 2016; 5:28-31. (rus.)
3. Belyaev A.V., Antipov S.S. Life cycle of construction objects at information simulation of buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 1:65-72. (rus.)
4. Sharmanov V.V., Simankina T.L., Maev A.E. Risk control construction through BIM. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 12(63):113-124. DOI: 10.18720/CUBS.63.6 (rus.)
5. Churbanov A.E., Shamara Yu.A. The impact of information modelling technology on the development of investment-construction process. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:7(118):824-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835 (rus.)
6. Volkov A., Chelyshkov P., Lysenko D. Information management in the application of bim in construction. stages of construction. *Procedia Engineering*. 2016; 153:833-837. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.251
7. Gusakova E.A. Information modeling of life cycle of high-rise construction projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:1(112):14-22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22 (rus.)
8. Karakozova I.V., Malykha G.G., Pavlov A.S., Panin A.S., Tesler N.D. Study of preparatory activities on using BIM-technologies in the medical enterprise design. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):100-111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111 (rus.)
9. Titova, I., Volkodav, V. The history and development of the classification system for the construction industry. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 1(86):20-29. DOI: 10.18720/CUBS.86.2 (rus.)
10. Edirisinghe R., London K. Comparative analysis of international and national level BIM standardization efforts and BIM adoption. *Proceeding of the 32nd CIB W78 Conference*. Eindhoven, The Netherlands, 2015; 149-158. URL: https://www.researchgate.net/publication/286496233_Comparative_Analysis_of_International_and_National_Level_BIM_Standardization_Efforts_and_BIM_adoption/
11. Knjazuk E.M., Mirza N.S. The use of building classifications for information modeling of roads. *CAD & GIS of Highways*. 2017; 1(8):13-19. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.1.3 (rus.)
12. Zayton H., Safdari H. The role of interoperability in construction projects. communication and the implementation of CoClass. *Master's Thesis in the Master's Programme Design and Construction project management. ACEX30-2018-94*. Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2018. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/256323/256323.pdf>
13. Ekholm A. A critical analysis of international standards for construction classification — results from the development of a new Swedish construction classification system. *In Proc. of the 33rd CIB W78 Conference*. Brisbane, Australia [5.2B], 2016. URL: https://portal.research.lu.se/portal/files/16339424/2016_10_31_Ekholm_CIB_W78_paper.pdf
14. Koch K., Chan P. Projecting an Information Infrastructure — Shaping a Community. *Engineering Project Organization Conference*. Colorado, 2013. URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/182975/local_182975.pdf
15. Balslev H. Implementing model semantics and a (MB)SE ontology in civil engineering & construction sector. *INCOSE International Sympos-*

sium. 2015; 25(1):687-696. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2015.00090.x

16. Balslev H. The Reference Designation System (RDS) a common naming convention for systems and their elements. *INCOSE International Symposium*. 2016; 26(1):1639-1656. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2016.00251.x

17. Skvortsov A.V. The review of international regulation in BIM sphere. *CAD & GIS for roads*. 2016; 2(7):4-48. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.1 (rus.).

18. Kozhara V.L. *New ideas for scientific classification : collective monography* / executive ed. Yu.I. Miroshnikov, M.P. Pokrovskiy. Ekaterinburg, UB RAS, 2010; 5:161-189. (rus.).

Received March 22, 2020.

Adopted in a revised form on April 20, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

BIONOTES: **Vladimir A. Volkodav** — General Director; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24, 2A, 58 Riga Avenue, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RISC: 1068607; vva@niccps.ru;

Ivan A. Volkodav — Candidate of Technical Sciences, Director of science; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24, 2A, 58 Riga Avenue, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RISC: 574245; via@niccps.ru.

Методика обоснования организационно-технологических характеристик комплекса объектов строительства на основе дробно-линейного программирования

Е.М. Попова, И.С. Птухина, А.Е. Радаев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В области реализации комплексных программ жилищного строительства, как перспективном направлении с точки зрения устранения наиболее важных проблем современного развития строительной отрасли (интенсивный рост городских территорий, низкое качество и высокая стоимость нового жилья, низкий уровень обеспеченности инфраструктурой), выявлена ключевая задача: рациональное обоснование характеристик комплекса объектов строительства с учетом взаимосвязей между количеством и характеристиками жилых домов и инфраструктурных объектов. По результатам анализа соответствующей научной литературы сделан вывод об ограниченности существующих инструментальных средств, в полной мере учитывающих ключевые особенности реализации комплексных программ жилищного строительства. Обоснована целесообразность проведения исследования, цель которого — разработка методики обоснования характеристик комплекса объектов строительства.

Материалы и методы. Разработана методика определения организационно-технологических характеристик комплекса объектов строительства на основе дробно-линейного программирования, предполагающая определение оптимального количества объектов жилищного строительства и инфраструктурных объектов в разрезе различных экземпляров и категорий по критерию максимизации индекса рентабельности соответствующего строительного проекта. Ключевые элементы разработанной методики — оптимизационные модели, являющиеся линейными относительно неизвестных переменных и потому реализуемые с использованием симплекс-метода в современных программных средах оптимизационного моделирования.

Результаты. Разработанная методика реализована на практическом примере с использованием программной среды Microsoft Excel и надстройки «Поиск решения». В результате выполнения соответствующих расчетных процедур получены конкретные значения количества объектов и инфраструктурных объектов в рамках строительного проекта.

Выводы. На основе адекватных результатов, полученных по итогам реализации предложенной методики на практическом примере, сделан вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства. Выявлены основные недостатки разработанной методики, связанные с отсутствием учета факторов влияния особенностей транспортной инфраструктуры и технологических ресурсов в рамках строительного процесса на характеристики проекта. Для устранения выявленных недостатков запланировано совершенствование методики на дальнейших этапах исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инвестиционно-строительный проект, градостроительное законодательство, объект строительства, комплексное развитие территорий, жилищное строительство, дробно-линейное программирование, оптимизация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попова Е.М., Птухина И.С., Радаев А.Е. Методика обоснования организационно-технологических характеристик комплекса объектов строительства на основе дробно-линейного программирования // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 907–938. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.907-938

Method of substantiation of organizational and processing characteristics of the complex of construction sites based on linear fractional programming

Ekaterina M. Popova, Irina S. Ptukhina, Anton E. Radaev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the field of implementation of integrated programs of housing construction as a promising direction from the point of view of solution of the most important problems of modern development of the construction industry (intensive growth of urban areas, low quality and high cost of new housing, poor infrastructure), the key task has been set: rationale of the characteristics of the complex of construction sites taking into account interrelations between the number and characteristics of residential buildings and infrastructure facilities. Based on the results of the analysis of the relevant scientific literature, the conclusion was made that the existing tools are limited and fully take into account the key features of the implementation of integrated programs of housing construction. Relevance of research which objective is development of a method of substantiation of characteristics of a complex of construction sites is substantiated.

Materials and methods. The organizational and process characteristics method of the complex of construction sites on the basis of linear fractional programming, which implies the determination of the optimal number of housing construction sites and infrastructure facilities in the context of different instances and categories by the criterion of maximizing the profitability index of the corresponding construction project was developed. The key elements of the developed method are optimization models, which are linear relatively unknown variables and therefore implemented using simplex method in modern software environments of optimization modeling.

Results. The developed method is implemented on a practical example using Microsoft Excel software environment and the "Solution Finder" add-in. As a result of performance of corresponding calculation procedures, concrete values of quantity of sites and infrastructure facilities within the limits of the building project have been received.

Conclusions. On the basis of adequate results obtained from the implementation of the proposed methodology on practical example, the conclusion was made about the high practical significance of the developed tool. The main shortcomings of the developed method are revealed, connected with the absence of consideration of factors of influence of features of a transport infrastructure and technological resources within the limits of construction procedure on characteristics of the project. In order to eliminate the identified shortcomings, it is planned to improve the methodology at further stages of the research.

KEYWORDS: investment and construction project, urban development legislation, construction site, integrated development of territories, housing construction, linear fractional programming, optimization

FOR CITATION: Popova E.M., Ptukhina I.S., Radaev A.E. Method of substantiation of organizational and processing characteristics of the complex of construction sites based on linear fractional programming. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):907-938. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.907-938 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия развития строительной отрасли, характеризующиеся высокими темпами разработки и реализации проектов в области жилищного строительства (с 2000 по 2018 гг. в Российской Федерации ежегодный ввод в эксплуатацию жилых домов увеличился с 207 до 515 м²/1000 чел.¹), определяют и появившиеся в этой связи проблемы, к основным из которых относят интенсивный рост городских территорий (и, как следствие, ухудшение экологической обстановки), низкое качество и высокую стоимость нового жилья, низкий уровень обеспеченности инфраструктурой [1–4]. При этом главные причины указанных проблем связаны как с несовершенством земельного и градостроительного законодательства, так и с высокой стоимостью земельных участков, а также отсутствием согласованности действий частных застройщиков с реальными потребностями города и горожан. Именно поэтому одним из наиболее перспективных направлений развития жилищного строительства, способствующего разрешению вышеупомянутых проблем, является реализация комплексных программ жилищного строительства [5–7]. Данный подход предполагает поэтапное освоение больших территорий на основе предварительно разработанного общего генерального плана, предусматривающего строительство не только жилых домов, но и сопутствующих инфраструктурных и социальных объектов, общественных пространств и мест приложения труда. Разработаны методики реализации этих проектов и принципы организации государственно-частного партнерства в рассматриваемой сфере [8–10]. Также в существующих исследованиях изучено влияние

разных типов застройки на эффективность использования территорий [11–13], влияние комплексного освоения территорий на экономический потенциал города [14–15]. Отдельно стоит выделить важность трудов, посвященных планированию и аудиту строительства [16–18], повышению эффективности строительства [19–21]. При разработке проектов комплексного освоения территорий недостаточное внимание к вопросам планирования, аудита и эффективности реализации может нанести серьезный ущерб проекту в целом.

Одна из ключевых задач, решаемых в рамках процессов реализации комплексных программ жилищного строительства, — обоснование характеристик комплекса объектов строительства с учетом взаимосвязей между количеством и характеристиками жилых домов и инфраструктурных объектов, а также ограниченной площади территории, доступной для освоения. Результаты анализа литературных источников (табл. 1), выполненные на начальных этапах исследования, позволили сделать следующие выводы:

- подавляющее большинство научных работ посвящено вопросам обоснования характеристик реальных строительных проектов на стадиях либо возведения, либо эксплуатации соответствующих объектов; при этом вопросы обоснования характеристик комплекса объектов строительства с учетом особенностей инфраструктуры рассматриваемого региона на стадии разработки проекта (которой присущи наименьшие затраты, связанные с изменением строительного проекта) практически не рассматриваются;

- инструментальные средства, используемые при обосновании характеристик комплекса объектов строительства, не учитывают большое количество факторов, оказывающих значительное влияние на адекватность получаемых результатов (в частности, соответствие строительного проекта

¹ Эффективность экономики России. Показатели отдельных отраслей: строительство // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru/folder/11186> (дата обращения 31.01.2020).

нормативной градостроительной документации, разнообразие типологий возводимых объектов и его влияние на стоимость, риски и окупаемость проектов), и поэтому могут быть применены для

получения исключительно ориентировочных значений указанных характеристик, требующих уточнения на дальнейших этапах процесса решения задачи.

Табл. 1. Результаты анализа литературных источников по соответствующей тематике

Table 1. Results of literature analysis on relevant topics

№ п.п / Item No.	Наименование разработки / Development name	Содержание / особенности разработки / Content / features of development	Недостатки / Shortcomings
1	Направления прогнозного анализа жизненного цикла (ЖЦ) проектов девелопмента недвижимости [22] / Areas of predictive life cycle analysis (LC) of real estate development projects [22]	• основные аспекты процесса разработки проекта девелопмента, подлежащие учету и анализу / the main aspects of the development process to be considered and analyzed; • основные принципы разработки современных градостроительных проектов / main principles of modern urban development	Отсутствие конкретных инструментальных средств для обоснования характеристик комплекса объектов строительства / lack of specific tools to substantiate the characteristics of the complex of construction sites
2	Подходы к оценке инвестиционного потенциала городских территорий [23] / Approaches to estimation of the investment potential of urban areas [23]	• учет расчетных (плотность застройки, материалоемкость, трудоемкость, потребность в инженерно-коммунальных ресурсах, продолжительность строительства) и экспертных факторов, позволяющих идентифицировать типы объектов с наиболее высокими инвестиционными показателями / account of calculated (housing density, consumption of materials, labor intensity, need in engineering and utilities resources, duration of construction) and expert factors that allow to identify types of sites with the highest investment ratios; • адекватная оценка стоимости всех структурных элементов жилого комплекса / reasonable assessment of the cost of all structural elements of the housing development	• зависимость технико-экономических показателей объектов строительства от типа застройки: при комплексном освоении территорий значения указанных показателей оказываются всегда выше аналогичных значений для других типов застройки / dependence of performance indicators of construction sites on the type of development: in case of complex development of territories, the values of these indicators are always higher than similar values for other types of development; • отсутствие учета стоимости строительства социальных и коммерческих объектов в рамках комплексного освоения территории / lack of accounting of the construction costs of social and commercial facilities as part of the integrated development of the territory; • отсутствие учета в полной мере норм градостроительного регулирования / lack of full accounting of urban development regulations
3	Экономическая надежность девелопмента комплексной жилой застройки [24] / Economic reliability of integrated residential development [24]	• Описание принципов построения и реализация аналитической модели, описывающей функциональные процессы строительного проекта и обеспечивающей вычисление показателей экономической эффективности проекта на каждом из этапов его реализации за счет наличия следующих основных особенностей / description of the principles of construction and implementation of the analytical model describing the functional processes of the construction project and ensuring the calculation of indicators of economic efficiency of the project at each stage of its implementation due to the presence of the following main features:	Невозможность непосредственного обоснования характеристик комплекса объектов строительства (ввиду необходимости формирования альтернативных вариантов и расчета соответствующих показателей экономической эффективности с последующим выбором наиболее предпочтительного варианта) и, как следствие, высокая трудоемкость реализации методики для решения рассматриваемой задачи / impossibility of direct

№ п.п / Item No.	Наименование разработки / Development name	Содержание / особенности разработки / Content / features of development	Недостатки / Shortcomings
		- использование функционально-надежного моделирования, предполагающего описание этапов и задач строительного проекта, в том числе в части объектов строительства в виде наборов функций с соответствующими параметрами надежности их выполнения / use of functional and reliable modeling, which implies description of stages and tasks of the construction project, including in the part of construction sites in the form of sets of functions with corresponding reliability parameters of their performance; - дополнительный учет параметров уровня государственно-частного партнерства и экономической надежности системы девелопмента / additional consideration of parameters of the level of public-private partnership and economic reliability of the development system; - оценка экономической надежности, осуществляемая по результатам расчета коэффициента экономической готовности, описывающего распределение инвестиционных ресурсов на различных организационных уровнях проекта / economic reliability assessment based on the results of the economic availability factor calculation describing the allocation of investment resources at different organizational levels of the project	► substantiation of characteristics of a complex of construction sites (in view of necessity of formation of options and calculation of corresponding indicators of economic efficiency with the subsequent choice of the most preferable option) and, as consequence, high labor intensity of implementation of a solution method of a considered problem
4	Методика обоснования организационно-технологических характеристик комплекса объектов строительства на основе дробно-линейного программирования [25] / To Issue of Mathematical Management Methods Applied for Investment-Building Complex under Conditions of Economic Crisis [25]	- описание инвестиционного анализа проекта, основанного на чистом дисконтированном доходе и длительности ЖЦ проекта / a description of the project investment analysis based on net discounted income and the duration of the project's life cycle; - учет основных экономических показателей инвестиционных проектов / record of the leading economic indicators of investment projects	- отсутствие примера применения методики на инвестиционных проектах разного масштаба / absence of an example of applying the methodology to investment projects of different scale; - отсутствие алгоритма отбора элементов, входящих в проект, по технико-экономическим показателям / lack of an algorithm for selecting the elements included in the project on cost-performance ratio
5	Эффективный подход к выбору входных переменных для предварительной оценки стоимости строительных проектов [26] / An Effective Approach to Input Variable Selection for Preliminary Cost Estimation of Construction Projects [26]	- анализ ключевых факторов, влияющих на инвестиционные показатели проекта строительства / analysis of key factors that affect the investment performance of the construction project; - процедура экспертной оценки параметров, влияющих на первоначальную стоимость проекта, и разделение их на группы по степени влияния / the procedure of expert assessment of parameters affecting the initial cost of the project and their division into groups according to the degree of impact; - описание способов увеличения точности расчетов стоимости проекта, а также выявление факторов, позволяющих скорректировать проект и улучшить его инвестиционные показатели / description of ways to increase the accuracy of project cost calculations, as well as identification of factors that allow to adjust the project and improve its investment performance	- ограниченное количество категорий объектов (рассматривается строительство мостов и объектов инфраструктуры) / limited number of site categories (bridges and infrastructure construction is considered); - невозможность применения разработок к процессам возведения объектов жилищного строительства / impossibility of applying the developments to the processes of housing development construction

Продолжение табл. 1 / Continuation of the table 1

№ п.п / Item No.	Наименование разработки / Development name	Содержание / особенности разработки / Content / features of development	Недостатки / Shortcomings
6	Стоимость жилищного строительства: исследование в Италии [27] / Residential construction cost: An Italian survey [27]	• анализ взаимосвязи между стоимостью недвижимости и социально-экономическими показателями жилья / analysis of the relationship between real estate value and socio-economic indicators of housing; • в качестве характеристик строительных объектов рассматриваются габариты зданий (объем и количество этажей), стоимость возведения единицы объема и качество отделки / dimensions of buildings (volume and number of floors), cost of erection of a unit of volume and quality of finishing are considered as characteristics of construction sites; • в качестве показателей управления проектом взяты продолжительность строительства и годовой оборот компании-девелопера / project management indicators include construction duration and annual turnover of the developer; • в качестве показателей для рынка недвижимости рассмотрены площади территорий под застройку и стоимость квадратного метра недвижимости в регионе / as indicators for the real estate market, the construction areas and the cost per square meter of real estate in the region are considered; • в качестве социально-демографических показателей взяты средний валовой доход и количество людей с высшим образованием среди жителей региона / the average gross income and the number of people with higher education in the region are taken as socio-demographic indicators	• данная статья предлагает методику для анализа уже реализованных проектов; / his article offers a methodology for analyzing already implemented projects; • показатели, взятые за основу применения методики, недостаточно полно отражают социально-экономическую ситуацию региона и экономический аспект жилищного строительства / the indicators taken as a basis for the methodology do not fully reflect the socio-economic situation in the region and the economic aspect of housing construction
7	Модель оценки стоимости с использованием модифицированных параметров для строительных проектов [28] / Cost Estimation Model Using Modified Parameters for Construction Projects [28]	• описание модели оценки стоимости проекта в строительстве, основанной на оптимизации расходов на промышленное изготовление железобетонных элементов зданий / description of the project cost estimate model in construction based on cost optimization for industrial production of reinforced concrete elements of buildings; • оценка стоимости элементов с использованием комбинации количественных и качественных методов / estimation of elements cost using a combination of quantitative and qualitative methods; • база данных, содержащая информацию о факторах, влияющих на выбор элементов, качественных характеристиках элементов и их стоимости, и поправочных коэффициентах для оценки подобных элементов / a database containing information on factors influencing the choice of elements, qualitative characteristics of elements and their cost, and correction factors for evaluation of such elements; • более точная оценка стоимости основных конструктивных элементов здания и, как следствие, прогнозной стоимости проекта в целом / a more accurate assessment of the cost of the main structural elements of the building and, as a result, the predicted cost of the project as a whole	относительно узкая область применения инструментальных средств: оценка стоимости строительства из промышленно изготовленных железобетонных элементов / relatively small scope of application of tools: estimation of construction cost from industrially produced reinforced concrete elements

№ п.п / Item No.	Наименование разработки / Development name	Содержание / особенности разработки / Content / features of development	Недостатки / Shortcomings
8	Методы оценки строительных проектов [29] / Evaluation methods for construction projects [29]	- описание методики повышения точности расчета основных инвестиционных характеристик проекта: уровень реинвестирования, фактическая сумма требуемых инвестиций и имеющиеся у компании средства / a description of the methodology to improve the accuracy of calculation of the main investment characteristics of the project: the level of reinvestment, the actual amount of required investments and the funds available to the company; - результаты применения методики, обеспечивающие более точную оценку экономических показателей проекта до его реализации / the results of application of the methodology, ensuring a more accurate assessment of the economic performance of the project before its implementation	отсутствие инструментов для корректировки показателей проекта, в случае их несоответствия нормативному уровню / lack of tools to adjust the project's indicators in case they do not meet the standard level; отсутствие учета влияния внешних факторов на основные показатели проекта / failure to take into account the impact of external factors on the key project indicators
9	Отбор критериев для оценки жилищных технологий [30] / Selection framework for evaluating housing technologies [30]	- описание методики оценивания качества проектов жилищного строительства / description of the methodology of quality assessment of housing construction projects; - описание базовых критериев оценки в области безопасности здания, функциональных и конструктивных требований, экономических показателей, удобства и стоимости эксплуатации, экологической устойчивости и качества отделки / description of basic assessment criteria in the field of building safety, functional and structural requirements, economic indicators, convenience and cost of operation, environmental sustainability and quality of finish; - отбор основных критериев оценки производится в соответствии с локальными строительными нормативами / the main assessment criteria are selected in accordance with local construction regulations; - реализация методики предполагает всестороннюю экспертную оценку различных технологий возведения зданий с целью последующего выбора варианта, наилучшим образом удовлетворяющего заявленным требованиям / implementation of the methodology implies a comprehensive expert assessment of various building technologies with a view to selecting an option that best meets the declared requirements	отсутствие учета градостроительной и социально-экономической составляющих проекта / lack of consideration of urban development and socio-economic components of the project

Вышеуказанное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, цель которого — разработка методики обоснования характеристик комплекса объектов строительства с использованием средств оптимизационного моделирования [31]. Методика должна обладать высокой универсальностью, в том числе за счет возможности ее реализации с использованием стандартных вычислительных алгоритмов, доступных в таких средах оптимизационного моделирования, как Microsoft Excel, Mathcad, Matlab и др.

Подробное описание разработанной методики, а также результаты ее реализации на практическом примере представлены в рамках последующих разделов данной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная методика базируется на следующих основных положениях:

1. Объектом исследования является строительный проект, находящийся на стадии разработки, предполагающий возведение комплекса объектов

строительства в рамках земельного участка ограниченной площади. Предмет исследования — характеристики указанного комплекса объектов строительства.

2. Комплекс объектов строительства включает в себя элементы различных категорий, обозначаемых целыми положительными числами: объекты категории 1 относятся к жилищному строительству; объекты остальных категорий не относятся к жилищному строительству; индекс каждой из упомянутых категорий в общем случае определяется назначением соответствующего объекта.

3. В части объектов, не относящихся к жилищному строительству, предложено рассматривать следующие категории: образовательное учреждение среднего образования, учреждение здравоохранения, детское дошкольное учреждение, физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн), торговый комплекс, паркинг.

4. Каждой отдельной категории в общем случае соответствует точное количество экземпляров объектов строительства, каждый из которых определяется фиксированными значениями требуемой площади земельного участка (с учетом парковочных мест), показателей емкости (пропускной способности), а также показателей, выявляющих экономическую эффективность строительного проекта в целом — капитальных затрат, связанных с возведением объекта, дисконтированным денежным потоком за фиксированный период времени.

5. Для учета степени соответствия комплекса объектов строительства требованиям нормативной градостроительной документации^{2, 3, 4} используется характеристика удельной емкости — отношения емкости рассматриваемого объекта строительства к количеству проживающих в составе комплекса объектов строительства.

6. Расчет граничного показателя удельной емкости для каждой из категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству, осуществляется с учетом требований нормативной градостроительной документации на основе отношения так называемого ключевого показателя (количество мест в образовательном учреждении, количество посещений медицинского учреждения, количество парковочных мест и т.д.) к базе указанного показателя (количество проживающих, жилая площадь, соответствующие

количеству парковочных мест как ключевому показателю, и т.д.). При этом в случае, если граничное значение показателя удельной емкости может быть вычислено на основе нормативных характеристик соотношения так называемой сервисной (непосредственно обеспечивающей оказание населению услуг соответствующим объектом) и общей площади объекта, в качестве исходных данных используются параметры элемента сервисной площади (секции — для торгово-развлекательного центра, плавательной дорожки — для бассейна и т.д.). Наименования элементов сервисной площади, ключевых показателей и соответствующих баз для отдельных категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству, представлены в табл. 2.

7. В качестве основного показателя, определяющего экономическую эффективность строительного проекта, рассматривается индекс рентабельности (Profitability Index — PI), вычисляемый для всего комплекса объектов строительства за фиксированный временной период.

8. Оценка экономических характеристик дисконтированного денежного потока и капитальных затрат на возведение для единицы каждого экземпляра объектов строительства производится исходя из известных сроков его сдачи в эксплуатацию.

9. Дисконтированный денежный поток для объектов жилищного строительства определяется доходами от реализации помещений (квартир) или сдачи их в аренду и потому имеет положительную величину, а для объектов, не относящихся к жилищному строительству, — затратами на их функционирование, а также денежным эквивалентом увеличения привлекательности комплекса объектов в целом для потенциальных клиентов (покупателей квартир в объектах жилищного строительства) и поэтому в общем случае имеет отрицательную величину.

10. Требуется определить количество единиц каждого экземпляра объектов строительства в составе каждой категории, при котором обеспечивается максимально возможное значение индекса рентабельности при условии, что суммарная площадь застройки не будет превышать площадь рассматриваемого земельного участка, а показатели удельной емкости для каждой категории объектов, не относящихся к жилищному строительству, будут находиться в пределах диапазонов допустимых значений, определяемых в том числе требованиями нормативной градостроительной документации.

Описание исходных данных и неизвестных переменных, рассматриваемых в рамках разработанной методики, представлено в табл. 3. Описание расчетных характеристик приведено в табл. 4.

² Об утверждении нормативов градостроительного проектирования Санкт-Петербурга: в ред. постановления Правительства Санкт-Петербурга от 11.04.2017 № 257 // Реестр нормативных правовых актов Санкт-Петербурга 21.04.2017, регистрационный № 22062.

³ СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с Изменениями № 1, 2). М. : Стандартинформ, 2019. 85 с.

⁴ СП 31-113-2004. Бассейны для плавания. М. : ФГУП ЦПП, 2005. 76 с.

Табл. 2. Наименования элементов сервисной площади, ключевых показателей и соответствующих баз для отдельных категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству

Table 2. Names of service area elements, key indicators and corresponding bases for certain categories of sites not related to housing construction

№ п.п. / Item No.	Наименование категории объектов, не относящихся к жилищному строительству / Name of the category of sites not related to housing construction	Наименование элемента сервисной площади / Name of the service area element	Ключевой показатель / Key indicator		База ключевого показателя / Key indicator base	
			Наименование / Name	Единица измере- ния / unit	Наименование / Name	Единица измере- ния / unit
1	Образовательное учрежде- ние среднего образования / Secondary school	—	количество мест / capacity	ед. / unit	количество жителей / number of residents	чел. / person
2	Учреждение здравоохранения / Health care institution	—	количество посещений за период / number of visits per period	ед./год / item(s)/ year	количество жителей / number of residents	чел. / person
3	Детское дошкольное учреждение / Child care center	—	количество мест / capacity	ед. / unit	количество жителей / number of residents	чел. / person
4	Физкультурно- оздоровительный комплекс (плавательный бассейн) / Sports and recreation center (swimming pool)	Дорожка / track	сервисная площадь / service area	м ² / m ²	количество жителей / number of residents	чел. / person
5	Торговый комплекс / Shopping mall	Секция / section	общая площадь / total area	м ² / m ²	количество жителей / number of residents	чел. / person
6	Паркинг / Parking	—	количество мест / capacity	ед. / pcs	жилая площадь / living space	м ² / m ²

Табл. 3. Исходные данные и неизвестные переменные, рассматриваемые в рамках разработанной методики

Table 3. Input data and unknown variables considered within the developed methodology

№ п.п. / Item No.	Наименование параметра / Name of parameter	Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1	Исходные данные / Initial data		
1.1	Общие исходные данные / General source data		
1.1.1	Общие параметры локации / General location parameters		
1.1.1.1	Максимальное количество проживающих в локации / Maximum number of residents in the location	чел. / persons	$H^{\max}$
1.1.1.2	Минимальное количество проживающих в локации / Minimum number of residents in the location	чел. / persons	$H^{\min}$
1.1.1.3	Общая площадь земельного участка / Total area of the land plot	м ² / m ²	$S^{1\max}$
1.1.1.4	Площадь парковочного места (с учетом проезда) / Parking space area (including driveway)	м ² /ед. / m ² /item(s)	S^p
1.1.1.5	Ставка дисконтирования / Discount rate	—	r^d
1.1.1.6	Номинальный срок строительства / Rated construction period	Лет / years	T
1.1.2	Параметры объектов жилищного строительства / Parameters of housing construction sites		
1.1.2.1	Количество экземпляров объектов жилищного строительства / Number of housing construction sites	ед. / item (s)	m_1

Продолжение табл. 3 / Continuation of the table 3

№ п.п. / Item No.	Наименование параметра / Name of parameter	Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1.1.2.2	Удельная площадь объекта (в расчете на количество проживающих) / The specific area of the site (based on the number of residents)	м ² / person(s)	s^h
1.1.2.3	Доля площади земельного участка в общей площади жилых помещений / Share of land plot in total area of residential premises	—	β^l
1.1.2.4	Доля площади парковочных мест в общей площади жилых помещений / Share of parking space in total living space area	—	β^p
1.1.3	Параметры объектов, не относящихся к жилищному строительству / Site parameters not related to housing construction		
1.1.3.1	Количество экземпляров объектов, не относящихся к объектам жилищного строительства / Number of sites not related to the housing construction sites	ед. / item (s)	m_2
1.1.3.2	Количество категорий объектов, не относящихся к объектам жилищного строительства / Number of site categories not related to the housing construction sites	ед. / item (s)	n
1.1.3.3	Период для анализа посещаемости объекта / Period for site attendance analysis	—	—
1.1.3.4	Максимальное количество посещений одним человеком объекта за период / Maximum number of site visits per person during the period	ед./год / Item(s)/year	$\varphi^{\max}$
1.1.3.5	Удельные затраты на аренду торговых помещений / Unit cost of retail space rental	тыс. руб./ (м ² ·год) / ths. rub./ (m ² ·per year)	c^l
1.1.3.6	Удельные затраты на коммунальные услуги для торговых помещений / Unit cost of utilities for commercial premises	тыс. руб./ (м ² ·год) / ths. rub./ (m ² ·per year)	c^{cs}
1.1.4	Параметры процедуры решения задачи / Parameters of the problem solution procedure		
1.1.4.1	Максимальное абсолютное отклонение фактического значения количества объектов от расчетного / Maximum absolute deviation of the actual value of the number of sites from the calculated value	ед. / item (s)	$\Delta^{\max}$
1.1.4.2	Коэффициент важности учета критерия суммарного дисконтированного денежного потока ⁽¹⁾ / Ratio of importance of discounted total cash flow criterion consideration ⁽¹⁾	—	w^{CF}
1.1.4.3	Коэффициент важности учета критерия суммарных капитальных затрат ⁽¹⁾ / Ratio of importance of considering the criterion of total capital expenditures ⁽¹⁾	—	w^K
1.2	Индексы и множества / Indexes and sets		
1.2.1	Индекс экземпляра объекта строительства / Construction site index	—	$i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$
1.2.2	Индекс категории объектов строительства / Construction site category index	—	$j = 1, 2, \dots, n + 1$
1.2.3	Множество индексов категорий объектов строительства / A set of indexes of construction site categories	—	$J = \{1, 2, \dots, n + 1\}$
1.2.4	Индекс категории объектов жилищного строительства ⁽²⁾ / Construction housing site category index ⁽²⁾	—	j^{rc}
1.2.5	Множество индексов категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству / A set of site categories indexes not related to housing construction	—	$J^{nrc} = J / \{j^{rc}\}$

Продолжение табл. 3 / Continuation of the table 3

№ п.п. / Item No.	Наименование параметра / Name of parameter		Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1.2.6	Индекс категории объектов, не относящихся к жилищному строительству ⁽³⁾ / Index of the category of sites not related to housing construction ⁽³⁾	образовательное учреждение среднего образования / secondary school	—	$j^{se} \in J^{nrc}$
1.2.7		учреждение здравоохранения / health care institutions	—	$j^{hc} \in J^{nrc}$
1.2.8		детское дошкольное учреждение / child care center	—	$j^{ps} \in J^{nrc}$
1.2.9		физкультурно-оздоровительный ком- плекс (плавательный бассейн) / sports and recreation center (swimming pool)	—	$j^{fc} \in J^{nrc}$
1.2.10		торговый комплекс / shopping mall	—	$j^{sm} \in J^{nrc}$
1.2.11		Паркинг / parking	—	$j^p \in J^{nrc}$
1.2.12	Множество целых чисел / Set of integers		—	$Z = \{...; -1; 0; 1; ...\}$
1.3	Параметры каждой отдельной категории j ($j \in J^{nrc}$) объектов, не относящихся к жилищному строи- тельству / Parameters for each individual category j ($j \in J^{nrc}$) of sites not related to housing construction			
1.3.1	Наименование категории объектов, не относящихся к жилищному строительству / Name of the category of sites not related to housing construction		—	—
1.3.2	Наименование категории объектов, не относящихся к жилищному строительству / Name of the category of sites not related to housing construction		ед./год / item(s)/year	Φ_j
1.3.3	Среднее количество посещений объекта одним человеком за период ⁽⁴⁾ / Average number of site visits per person per period ⁽⁴⁾		—	—
1.3.4	Наименование элемента сервисной площади ⁽⁵⁾ / Name of the service area element ⁽⁵⁾		чел./ед. / person(s)/ item(s)	H_j^{ef}
1.3.5	Номинальное количество человек, обслуживаемое на элементе сервисной площади ⁽⁵⁾ / Nominal number of persons served on the service area element ⁽⁵⁾		м²/ед. / m²/item(s)	S_j^{ef}
1.3.6	Размер элемента сервисной площади ⁽⁵⁾ / Size of the service area element ⁽⁵⁾		—	γ_j^{ef}
1.3.7	Доля сервисной площади в общей площади объекта ⁽⁵⁾ / Share of service area in total area of the site ⁽⁵⁾		разн. ⁽⁶⁾ / dif. ⁽⁶⁾	k_j
1.3.8	Нормативное значение ключевого показателя для расчета удельной емкости / Rated value of key indicator for specific capacity calculation		разн. ⁽⁶⁾ / dif. ⁽⁶⁾	k_j^b
1.3.9	Нормативное значение базы ключевого показателя для расчета удельной емкости / Rated value of key indicator base for specific capacity calculation		—	$\Delta\alpha_j$
1.4	Параметры каждого отдельного экземпляра i ($i = 1, 2, ..., m_1 + m_2$) объекта строительства / Parameters of each individual instance i ($i = 1, 2, ..., m_1 + m_2$) of the construction site			
1.4.1	Наименование экземпляра объекта строительства / Construction site instance name		—	—
1.4.2	Индекс категории / Category index		—	j_i
1.4.3	Общая площадь единицы экземпляра / Total area per instance unit		м²/ед. / m²/item(s)	S_i
1.4.4	Количество этажей единицы экземпляра / Number of floor of a unit of instance		item(s) / item(s)	n_i
1.4.5	Проектная емкость единицы экземпляра ⁽⁷⁾ / Design capacity of a unit of instance ⁽⁷⁾		чел./ед. / person(s)/ item(s)	H_i

Окончание табл. 3 / End of the table 3

№ п.п. / Item No.	Наименование параметра / Name of parameter		Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1.4.6	Проектная емкость парковочного места	в единицах общей площади ⁽⁸⁾ / in total area units ⁽⁸⁾	м²/ед. / m²/item(s)	s_i^p
1.4.7	для единицы экземпляра / Design capacity of the parking space for a unit of instance	в единицах проектной емкости ⁽⁹⁾ / in design capacity units ⁽⁹⁾	чел./ед. / person(s)/ item(s)	h_i^p
1.4.8	Коэффициент пересчета количества парковочных мест / Conversion factor for the number of parking spaces		—	μ_i^p
1.4.9	Площадь земельного участка для единицы экземпляра / Land plot area for a unit of instance	удельная по площади объекта ⁽¹⁰⁾ / specific area according to site area ⁽¹⁰⁾	м²/(м²·ед.) / m²/(m²· item(s))	s_i^{lbs}
1.4.10		удельная по емкости объекта ⁽⁹⁾ / specific area according to site capacity ⁽⁹⁾	м²/(чел.·ед.) / m²/ (person(s) item(s))	s_i^{lbh}
1.4.11	Коэффициент пересчета первоначальной стоимости / Initial cost conversion factor		—	μ_i^c
1.4.12	Базовая первоначальная стоимость единицы экземпляра / Basic initial cost per unit of instance		тыс. руб./ ед. / ths. rub./item(s)	C_i^b
1.4.13	Дисконтированный денежный поток для единицы экземпляра / Discounted cash flow for a unit of instance		тыс. руб./ ед. / ths. rub./item(s)	CF_i
2	Неизвестные переменные / Unknown variables			
2.1	Количество единиц каждого экземпляра i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) объектов строительства / Number of units of individual instance i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) of the construction site		ед. / item (s)	x_i
2.2	Расчетное отношение количества единиц каждого экземпляра i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) объектов строительства к суммарным капитальным затратам на возведение комплекса объектов строительства ⁽¹¹⁾ / Calculated ratio of the number of units of each instance i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) of construction sites to the total capital expenditures of construction site complex ⁽¹¹⁾		ед./тыс. руб. / item (s)/ths. rub.	$z_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^{m_1+m_2} K_i x_i}$
2.3	Расчетное обратное значение суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов строительства ⁽¹¹⁾ / Calculated inverse value of total capital expenditures on erection of a construction site complex ⁽¹¹⁾		тыс. руб. ⁻¹ / ths. rub. ⁻¹	$z_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m_1+m_2} K_i x_i}$

Примечание / Note:

⁽¹⁾ значения элементов исходных данных должны удовлетворять условиям / values of the source data elements must meet the conditions: $\begin{cases} w^{CF} + w^K \geq 0; \\ w^{CF} + w^K = 1; \end{cases}$

⁽²⁾ в наиболее общем случае / as a general rule $j^{nc} = 1$;

⁽³⁾ в наиболее общем случае / as a general rule $J^{nrc} = \{j^{se}, j^{hc}, j^{ps}, j^{fc}, j^{sm}, j^p\}$;

⁽⁴⁾ элемент исходных данных задается только для категорий объектов «Учреждение здравоохранения», «Физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн)» и «Торговый комплекс» / the element of initial data is set only for the categories of the following sites: “Health care institution”, “Sports and recreation center (swimming pool)” and “Shopping mall” ($j \in \{j^{hc}, j^{fc}, j^{sm}\}$);

⁽⁵⁾ элемент исходных данных задается только для категорий объектов «Физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн)» и «Торговый комплекс» / the element of initial data is set only for the categories of the following sites: “Sports and recreation center (swimming pool)” and “Shopping mall” ($j \in \{j^{fc}, j^{sm}\}$);

⁽⁶⁾ единицы измерения элементов исходных данных в общем случае имеют различную природу, определяемую категорией рассматриваемых объектов, не относящихся к жилищному строительству, в соответствии с данными табл. 2 /

as a general rule, the units of measurement of the source data elements have different nature determined by the category of the sites under consideration which are not related to housing construction, according to the data of the table 2;

(7) элемент исходных данных задается только для экземпляров объектов, соответствующих категориям «Образовательное учреждение среднего образования», «Учреждение здравоохранения» и «Детское дошкольное учреждение» / the source data element is set only for instances of sites corresponding to categories “Secondary school”, “Health care institution” and “Child care center” ($j_i \in \{j^{se}, j^{hc}, j^{ps}\}$);

(8) элемент исходных данных задается только для экземпляров объектов, соответствующих категории «Торговый комплекс» / the source data element is set only for the instances of sites corresponding to the category “Shopping mall” ($j_i = j^{sm}$);

(9) элемент исходных данных задается только для экземпляров объектов, соответствующих категориям «Образовательное учреждение среднего образования», «Учреждение здравоохранения», «Детское дошкольное учреждение» и объекта «Физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн)» / the source data element is set only for instances of sites corresponding to categories “Secondary school”, “Health care institution”, “Child care center”, and “Sports and recreation center (swimming pool)” ($j_i \in \{j^{se}, j^{hc}, j^{ps}, j^{fc}\}$);

(10) элемент исходных данных задается только для экземпляров объектов, соответствующих жилищному строительству (при этом в наиболее общем случае $s_i^{lbs} = \beta^l$), а также категории «Торговый комплекс» объектов, не относящихся к жилищному строительству / the source data element is set only for the instances of sites corresponding to the housing construction (at the same time as a general rule $s_i^{lbs} = \beta^l$), and also to the category of sites “Shopping mall” not related to housing construction ($j_i \in \{j^{rc}, j^{sm}\}$);

(11) взаимосвязь неизвестных переменных с переменными п. 2.1 табл. определяется формулой / interrelationship of unknown variables to the variables of cl. 2.1 of the table is defined by the formula $x_i = \frac{z_i}{z_0}$, $i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$.

Табл. 4. Расчетные характеристики, учитываемые в рамках разработанной методики

Table 4. Design characteristics considered within the developed methodology

№ п.п. / Item No.	Наименование расчетной характеристики / Design characteristic name	Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной категории j ($j \in J^{nrc}$) объектов, не относящихся к жилищному строительству / Characteristics calculated for each individual category j ($j \in J^{nrc}$) of sites not related to housing construction		
1.1	Удельное количество человек, обслуживаемое на сервисной площади, для объектов категорий «Физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн)» и «Торговый комплекс» / Specific number of persons serviced at the service area for the sites of the categories “Sports and recreation center (swimming pool)” and “Shopping mall”	чел./м ² / person (s)/m ²	$h_j^{ef} = \frac{H_j^{ef}}{S_j^{ef}}, j \in \{j^{fc}, j^{sm}\}$
1.2	Удельное количество человек, обслуживаемое на общей площади, для объектов категорий «Физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн)» и «Торговый комплекс» / Specific number of persons serviced at the total area for the sites of the categories “Sports and recreation center (swimming pool)” and “Shopping mall”	чел./м ² / person (s)/m ²	$h_j = h_j^{ef} \cdot \gamma_j^{ef}, j \in \{j^{fc}, j^{sm}\}$
1.3	Минимальная (нормативная) удельная емкость объекта определенной категории / Minimum (standard) specific capacity of a site of a certain category	—	$\alpha_j^{\min} = \frac{k_j}{k_j^b}, j \in \{j^{se}, j^{ps}\}$
1.4	учреждение здравоохранения (табл. 2, п. 2) / health care institutions (table 2, cl. 2)	—	$\alpha_j^{\min} = \frac{k_j}{\phi_j \cdot k_j^b}, j = j^{hc}$
1.5	физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн) (табл. 2, п. 4) / sports and recreation center (swimming pool) (table 2, cl. 4)	—	$\alpha_j^{\min} = \frac{h_j^{ef} \cdot \varphi^{\max} \cdot k_j}{\phi_j \cdot k_j^b}, j = j^{fc}$

Продолжение табл. 4 / Continuation of the table 4

№ п.п. / Item No.	Наименование расчетной характеристики / Design characteristic name		Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
1.6		торговый комплекс (табл. 2, п. 5) / shopping mall (table 2, cl. 5)	—	$\alpha_j^{\min} = \frac{h_j \cdot \varphi^{\max} \cdot k_j}{\varphi_j \cdot k_j^b}, j = j^{sn}$
1.7		паркинг (табл. 2, п. 6) / parking (table 2, cl. 6)	—	$\alpha_j^{\min} = \frac{s^h \cdot k_j}{k_j^b}, j = j^p$
1.8	Максимальная удельная емкость объекта / Maximum specific capacity of the site		—	$\alpha_j^{\max} = \alpha_j^{\min} + \Delta \alpha_j$
2	Характеристики, вычисляемые для каждого отдельного экземпляра i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) объекта строительства / Characteristics calculated for each specific instance i ($i = 1, 2, \dots, m_1 + m_2$) of the construction site			
2.1	Проектная емкость для экземпляра объектов определенной категории / Rated capacity for an instance of sites of a certain category	объекты жилищного строительства ⁽¹⁾ / housing construction sites ⁽¹⁾	чел./ед./ person(s)/ item(s)	$H_i = \left\lfloor \frac{S_i}{s^h} \right\rfloor, j_i = j^{rc}$
2.2		физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн) (табл. 2, п. 4) ⁽¹⁾ / sports and recreation center (swimming pool) (table 2, cl. 4) ⁽¹⁾	чел./ед./ person(s)/ item(s)	$H_i = \left\lfloor S_i \cdot h_{j=j_i} \right\rfloor, j_i = j^{fc}$
2.3		торговый комплекс (табл. 2, п. 5) ⁽²⁾ / shopping mall (table 2, cl. 5) ⁽²⁾	чел./ед./ person(s)/ item(s)	$H_i = \left\lfloor \frac{S_i \cdot k_{j=j_i}^b}{k_{j=j_i}} \right\rfloor, j_i = j^{sm}$
2.4	Базовое количество парковочных мест для единицы экземпляра объектов определенной категории / Basic number of parking spaces for a unit of instance of sites of a certain category	объекты жилищного строительства ⁽³⁾ / housing construction sites ⁽³⁾	ед./ед. / item(s)/ item(s)	$p_i^b = \frac{P_i}{\mu_i^p}, j_i = j^{rc}$
2.5		образовательное учреждение среднего образования, учреждение здравоохранения, детское дошкольное учреждение, физкультурно-оздоровительный комплекс (плавательный бассейн) (табл. 2, пп. 1–4) ⁽⁴⁾ / secondary school, health care institution, child care center, sports and recreation center (swimming pool) (table 2, cl. 1–4) ⁽⁴⁾	ед./ед. / item(s)/ item(s)	$p_i^b = \left\lfloor \frac{H_i}{h_i^p} \right\rfloor,$ $j_i \in \{j^{se}; j^{hc}; j^{ps}; j^{fc}\}$
2.6		торговый комплекс (табл. 2, п. 5) ⁽⁴⁾ / shopping mall (table 2, cl. 5) ⁽⁴⁾	ед./ед. / item(s)/ item(s)	$p_i^b = \left\lfloor \frac{S_i}{s_i^p} \right\rfloor, j_i = j^{sm}$
2.7		объекты жилищного строительства ⁽¹⁾ / housing construction sites ⁽¹⁾	ед./ед. / item(s)/ item(s)	$p_i = \left\lfloor \frac{S_i^{lp}}{s_i^p} \right\rfloor, j_i = j^{rc}$
2.8		объекты, не относящиеся к жилищному строительству (табл. 2) ⁽²⁾ / sites not related to housing construction (Table 2) ⁽²⁾	ед./ед. / item(s)/ item(s)	$p_i = \left\lceil p_i^b \cdot \mu_i^p \right\rceil, j_i \in J^{nrc}$
2.9	Удельная по емкости объекта площадь земельного участка для экземпляра объектов, соответствующих категории «Торговый комплекс» ⁽⁵⁾ / Specific capacity site area of the land plot for a copy of sites corresponding to the category “Shopping mall” ⁽⁵⁾		м ² /(чел.·ед.) / м ² / (person(s)· item(s))	$s_i^{lbh} = \frac{s_i^{lbs} \cdot S_i}{H_i}, j_i = j^{sm}$

Окончание табл. 4 / End of the table 4

№ п.п. / Item No.	Наименование расчетной характеристики / Design characteristic name	Единица измерения / Unit	Обозначение / выражение / Designation / expression
2.10	объекты жилищного строительства; торговый комплекс (табл. 2, п. 5) / housing construction sites; shopping mall (table 2, cl. 5)	м²/ед. / m²/item(s)	$S_i^{lb} = \frac{S_i^{lbs} \cdot S_i}{n_i}, j_i \in \{j^{rc}; j^{sm}\}$
2.11	Базовая площадь земельного участка для единицы экземпляра объектов определенной категории / Base area of the land plot for a unit of instance of sites of a certain category	м²/ед. / m²/item(s)	$S_i^{lb} = \frac{S_i^{lbh} \cdot H_i}{n_i}, j_i \in \{j^{se}; j^{hc}; j^{ps}; j^{fc}\}$
2.12	Площадь земельного участка для парковочных мест по отношению к единице экземпляра объектов определенной категории / Area of the land plot for parking spaces in relation to a unit of an instance of sites of certain category	м²/ед. / m²/item(s)	$S_i^{lp} = \beta^p \cdot S_i, j_i = j^{rc}$
2.13	Площадь земельного участка для парковочных мест по отношению к единице экземпляра объектов определенной категории / Area of the land plot for parking spaces in relation to a unit of an instance of sites of certain category	м²/ед. / m²/item(s)	$S_i^{lp} = S^p \cdot p_i, j_i \in J^{nrc}$
2.14	Номинальная площадь земельного участка для единицы экземпляра / sites not related to housing construction (Table 2)	м²/ед. / m²/item(s)	$S_i^l = S_i^{lb} + S_i^{lp}$
2.15	Скорректированная первоначальная стоимость единицы экземпляра / Nominal area of land plot for a unit of instance	тыс. руб./ед. / ths. rub./item(s)	$C_i = C_i^b \cdot \mu_i^c$
2.16	Капитальные затраты на возведение единицы экземпляра / Capital expenditures for the construction of a unit of instance	тыс. руб./ед. / ths. rub./item(s)	$K_i = \frac{C_i}{(1 + r^d)^T}$

Примечание / Note:

(1) [...] в математическом выражении обозначает операцию округления соответствующего значения до ближайшего меньшего целого / in mathematical expression it indicates the operation of rounding the corresponding value to the nearest smaller whole number;

(2) [...] в математическом выражении обозначает операцию округления соответствующего значения до ближайшего целого / in mathematical expression it indicates the operation of rounding the corresponding value to the nearest whole number;

(3) вычисление характеристики производится по результатам предварительного расчета характеристики строки 2.7 табл. / the characteristic is calculated based on the results of preliminary calculation of the characteristic of the line 2.7 of the table;

(4) [...] в математическом выражении обозначает операцию округления соответствующего значения до ближайшего большего целого / in mathematical expression it indicates the operation of rounding the corresponding value to the nearest larger whole number;

(5) расчетная характеристика не используется при реализации дальнейших этапов методики, а результаты вычисления характеристики носят информативный характер / the design characteristic is not used in the implementation of further stages of the methodology, and the results of the calculation of the characteristic are informative.

Для решения задачи, указанной в п. 10 основных положений, было предложено использовать средства оптимизационного моделирования в составе специализированных программных сред (в том числе программ Microsoft Excel, Mathcad, Matlab и др.). В этой связи структура методики, опи-

сываемая в виде блок-схемы на рис. 1 и 2 (описание отдельных элементов оптимизационных моделей представлено в табл. 5), предполагает последовательное выполнение следующих основных этапов.

1. Подготовка исходных данных в части общих параметров рассматриваемого земельного участка

и планируемого комплекса объектов строительства, а также предполагаемых категорий и экземпляров объектов, частных параметров для каждой отдельной категории объектов и каждого рассматриваемого экземпляра в соответствии с подразделом 1 табл. 3. Элементы исходных данных в виде конкретных текстовых или числовых значений структурируются и заносятся в отдельный расчетный файл, предварительно созданный в выбранной программной среде оптимизационного моделирования (оценка целесообразности выбора той или иной программы осуществляется лицом, решающим задачу, самостоятельно исходя из особенностей решаемой задачи, ее масштабов и трудоемкости нахождения решения).

2. Задание неизвестных переменных в соответствии с подразделом 2 табл. 3. Важно отметить, что указанные переменные можно условно разделить на две категории: основные, непосредственно определяющие решение рассматриваемой задачи (количество каждого экземпляра объектов строительства — п. 2.1 табл. 3) и дополнительные, непосредственно не описывающие решение задачи, но при этом необходимые для эффективного нахождения последнего. При этом в вышеуказанном расчетном файле производится объявление количественных категорий без задания для них конкретных значений.

3. Формирование расчетных характеристик в соответствии с табл. 4 (важно отметить, что все указанные расчетные характеристики определяются только значениями элементов исходных данных и не зависят от неизвестных переменных). При этом в вышеуказанном файле производится объявление дополнительных количественных категорий и задание соответствующих расчетных формул.

4. Выполнение процедур для реализации концептуальной оптимизационной модели обоснования характеристик комплекса объектов строительства, определяемой выражениями (1)–(6), приведено на рис. 1. Ввиду специфической конфигурации целевой функции указанная модель соответствует задаче дробно-линейного программирования и является нелинейной относительно неизвестных переменных. Данное обстоятельство, в свою очередь, делает затруднительным процесс реализации модели с использованием стандартных алгоритмов нелинейной оптимизации (метода Ньютона, метода сопряженных градиентов, метода обобщенного понижающего градиента и др.) ввиду большого количества переменных. Именно с этой целью была предложена декомпозиция процедуры реализации концептуальной модели в виде последовательного выполнения следующих подэтапов:

4.1. Построение и реализация оптимизационной модели для предварительного обоснования характеристик комплекса объектов строительства, определяемой выражениями (7)–(13) на рис. 1 и получаемой посредством замены основных пере-

менных (п. 2.1 табл. 3) концептуальной модели, описываемой выражениями (1)–(6) на рис. 1, на дополнительные (пп. 2.2 и 2.3 табл. 3) переменные. Указанный способ преобразования исходной концептуальной модели соответствует общеизвестному методу решения задач дробно-линейного программирования. При этом получаемая по результатам указанного преобразования модель (выражения (7)–(13) на рис. 1) является линейной относительно дополнительных неизвестных переменных и поэтому может быть эффективно реализована с использованием симплекс-метода, доступного в надстройке «Поиск решения» программы Microsoft Excel, надстройке Optimization Toolbox программы Matlab, программы Mathcad и др.

4.2. Анализ результатов, полученных по итогам реализации оптимизационной модели для предварительного обоснования характеристик комплекса объектов строительства, — оптимальных значений дополнительных переменных. Несмотря на то что указанные переменные не имеют физического смысла, положительное или нулевое значение каждой отдельной переменной, описываемой п. 2.2 табл. 3, позволит сделать вывод соответственно о целесообразности или нецелесообразности включения в строительный проект соответствующего экземпляра объектов.

4.3. Фиксация предварительных значений дисконтированного денежного потока и капитальных затрат для рассматриваемого строительного проекта для использования в качестве дополнительных исходных данных в рамках последующих этапов реализации методики.

4.4. Построение и реализация оптимизационной модели для окончательного обоснования характеристик комплекса объектов строительства, определяемой выражениями (16)–(22) на рис. 1. Необходимость выполнения данного подэтапа обусловлена нецелочисленностью значений основных переменных (п. 2.1 табл. 3), получаемых при вычислении последних на основе оптимальных значений дополнительных переменных (пп. 2.2 и 2.3 табл. 3) как результатов реализации модели в рамках подэтапа 4.1 по формуле, представленной в п. 11 примечания к табл. 3. При этом модель, описываемая выражениями (16)–(22) на рис. 1, является результатом рассмотрения концептуальной модели (выражения (1)–(6) на рис. 1) в виде двухкритериальной (максимизация суммарного дисконтированного денежного потока в рамках строительного проекта, минимизация суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов) с последующим приведением к однокритериальному виду посредством применения базового метода идеальной точки по отношению к нормированным значениям критериев, представленным в виде относительных отклонений от первоначальных значений. При этом по отношению к основным переменным указанной модели

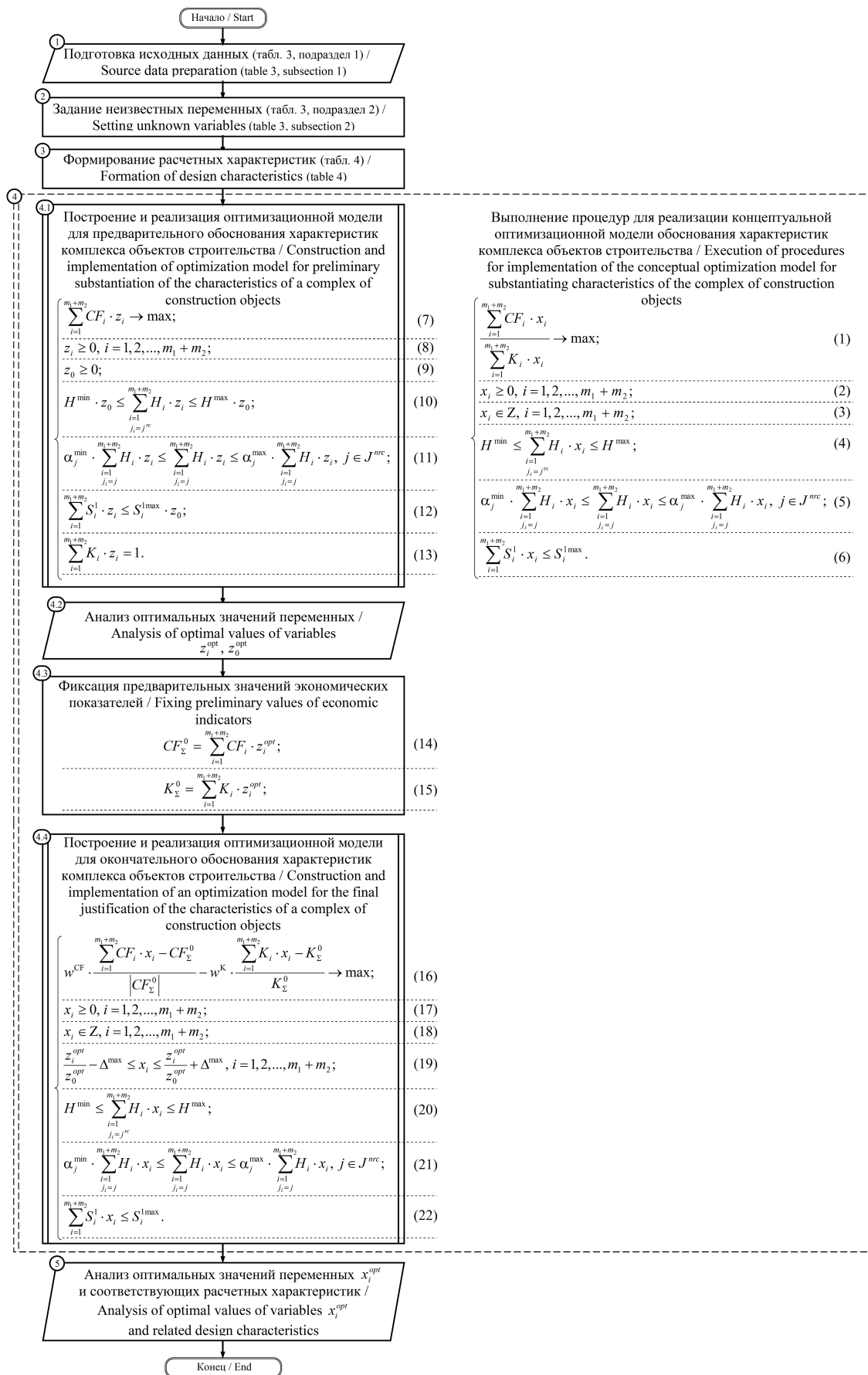


Рис. 1. Блок-схема, описывающая структуру разработанной методики
Fig. 1. Flow chart describing the structure of the developed methodology

Табл. 5. Описание структурных элементов оптимизационных моделей, используемых в процессе реализации методики
Table 5. Description of structural elements of optimization models used in the process of implementation of the methodology

Номер выражения, соответствующего элементу оптимизационной модели / Number of the expression corresponding to the element of the optimization model			Описание / Description
концептуальная модель / conceptual model	модель для предварительного обоснования / preliminary substantiation model	модель для окончательного обоснования / final substantiation model	
1	7	—	Целевая функция — индекс рентабельности строительного проекта как отношение суммарного дисконтированного денежного потока к суммарным капитальным затратам на возведение комплекса объектов строительства — максимизируется / Target function is a profitability index of a construction project as a ratio of total discounted cash flow to total capital expenditures of erection of a complex of construction sites – maximized.
—	—	16	Комплексный показатель — сумма произведений нормированных показателей — относительных отклонений текущих значений от предварительных, определяемых выражениями (14) и (15) на рис. 1, — суммарного дисконтированного денежного потока и суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов строительства и соответствующих коэффициентов значимости — максимизируется / Complex index is the sum of productions of controlled parameter – relative deviations of current values from preliminary ones, defined by expressions (14) and (15) in Fig. 1, – total discounted cash flow and total capital expenditures of erection of the complex of construction sites and corresponding coefficients of significance – maximized.
2	8, 9	17	Ограничения, определяющие неотрицательность неизвестных переменных / Restrictions defining the non-negativity of unknown variables
3	—	18	Ограничения, определяющие целочисленность неизвестных переменных / Restrictions defining the integrality of unknown variables
—	—	19	Ограничения, определяющие заданную степень соответствия значений основных переменных оптимальным значениям дополнительных переменных, предварительно найденным по результатам выполнения подэтапа 4.1 методики / Restrictions that determine the specified degree of conformity of the values of the main variables with the optimal values of additional variables, previously found by the results of substage 4.1 of the methodology
4	10	20	Ограничения, в соответствии с которыми суммарная расчетная емкость (количество проживающих) всех экземпляров объектов жилищного строительства должна соответствовать диапазону предельно допустимых значений / Restrictions according to which the total design capacity (number of residents) of all housing construction sites must comply with the range of threshold limit values
5	11	21	Ограничения, в соответствии с которыми суммарная расчетная емкость всех экземпляров объектов, не относящихся к жилищному строительству, должна соответствовать диапазону предельно допустимых значений, определяемых общим количеством проживающих, а также показателями удельной емкости в соответствии с нормативами градостроительного законодательства / Restrictions according to which the total estimated capacity of all instances of sites not related to housing construction shall correspond to the range of threshold limit values determined by the total number of residents, as well as indicators of specific capacity in accordance with the standards of urban development legislation

Номер выражения, соответствующего элементу оптимизационной модели / Number of the expression corresponding to the element of the optimization model			Описание / Description
концептуальная модель / conceptual model	модель для предварительного обоснования / preliminary substantiation model	модель для окончательного обоснования / final substantiation model	
6	12	22	Ограничение, в соответствии с которым суммарная площадь земельного участка, необходимая для возведения всех экземпляров объектов в рамках строительного проекта, не должна превышать предельного допустимого значения / A restriction according to which the total area of the land plot necessary for the construction of all instances of the sites within the construction project shall not exceed the threshold limit value
—	13	—	Ограничение, определяющее целостность неизвестных переменных в соответствии с их физическим смыслом (см. п. 2.2. табл. 3) / A restriction that determines the integrity of unknown variables according to their physical meaning (see cl. 2.2. table 3)

применяются дополнительные прямые ограничения (выражение (19) на рис. 1), в которых граничные значения переменных определяются результатами реализации модели, описанной в рамках подэтапа 4.1, а также параметром отклонения — элементом исходных данных (п. 1.1.4.1 табл. 3). Также важно отметить, что модель для окончательного обоснования характеристик комплекса объектов строительства (выражения (16)–(22) на рис. 1) является линейной, ее реализация выполняется аналогично модели, описанной в рамках подэтапа 4.1.

5. Анализ полученных в результате выполненных процедур оптимальных значений основных переменных (п. 2.1 табл. 3) и соответствующих расчетных характеристик — компонент оптимизационной модели, определяемой выражениями (1)–(6) на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика была реализована на практическом примере — задаче обоснования организационно-технологических характеристик строительного проекта в части количества объектов строительства, соответствующих следующим экземплярам: жилой дом — монолит — 238 квартир; жилой дом — монолит — 45 квартир; жилой дом — монолит — 94 квартиры; школа серия 222-1-ЛГ; школа проект 12252.11; поликлиника проект Р; детское дошкольное учреждение; спортивный комплекс — плавательный бассейн; торговый комплекс. Для реализации методики использована программная среда Microsoft Excel, в рамках которой был

создан файл, произведена разметка таблиц в рамках отдельного рабочего листа с последующим заполнением отдельных ячеек таблиц значениями исходных данных (табл. 3, подраздел 1), а также формулами для вычисления расчетных характеристик (табл. 4), либо резервированием ячеек для значений неизвестных переменных (табл. 3, подраздел 2). Общий вид рабочего листа (с указанием результатов реализации методики) в составе файла Microsoft Excel представлен на рис. 2–5, принципы заполнения ячеек рабочего листа в процессе реализации разработанной методики представлены в табл. 6. Для реализации оптимизационных моделей, предусмотренных в рамках методики (подэтапы 4.1 и 4.4), использована надстройка «Поиск решения», описание соответствующих параметров приведено в табл. 7. Реализация каждой оптимизационной модели была выполнена штатно — соответствующее решение найдено. На основе полученных результатов (рис. 4 и 5) сделаны следующие выводы:

1. В рамках строительного проекта целесообразно предусмотреть:

- в части объектов жилищного строительства: 31 единицу для экземпляра «Жилой дом — монолит — 94 квартиры»;
- в части объектов, не относящихся к жилищному строительству: 2 единицы экземпляра «Школа серия 222-1-ЛГ1»; 2 единицы экземпляра «Поликлиника проект Р»; 6 единиц экземпляра «Детское дошкольное учреждение», 12 единиц экземпляра «Спортивный комплекс — плавательный бассейн», 1 единицу экземпляра «Торговый комплекс».

2. Индекс рентабельности, соответствующий вышеуказанному решению (результату реализации подэтапа 4.4 методики — см. рис. 1), составляет $PI \approx -0,172468$; отрицательные значения показателя обусловлены отрицательным суммарным значением дисконтированного денежного потока ввиду необходимости возведения большого количества объектов, не относящихся к жилищному строительству, с целью выполнения требований нормативной градостроительной документации. При этом важно отметить, что по результатам предварительного

обоснования характеристик комплекса объектов строительства (выполнения подэтапа 4.1 методики — см. рис. 1) вышеуказанная характеристика составляла $PI \approx -0,163652$. Таким образом, в рамках уточненного обоснования характеристик комплекса объектов строительства (подэтап 4.4 методики — см. рис. 1) было найдено целочисленное решение, обуславливающее незначительное снижение качества (уменьшение значения PI) в рамках отклонения от предварительно полученного нецелочисленного решения как математического идеала.

Табл. 6. Принципы заполнения ячеек рабочего листа книги Microsoft Excel для решения рассматриваемой задачи

Table 6. Principles of filling the cells of Microsoft Excel book worksheet to solve the problem in question

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ / Addresses of worksheet cells ⁽¹⁾	Содержимое / формула / Content / formula	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description
--	--	---

Табл. 1 / Table 1

M5	Значение элемента исходных данных / Value of the source data element	Табл. 3, п. 1.1.1.1; рис. 1, выражение (20), правая часть / Table 3, cl. 1.1.1.1; fig. 1, expression (20), right part
M6	Значение элемента исходных данных / Value of the source data element	Табл. 3, п. 1.1.1.2; рис. 1, выражение (20), левая часть / Table 3, cl. 1.1.1.2; fig. 1, expression (20), left part
M7	Значение элемента исходных данных / Value of the source data element	Табл. 3, п. 1.1.1.3; рис. 1, выражение (22), правая часть / Table 3, cl. 1.1.1.3; fig. 1, expression (22), right part
M8:M10	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, пп. 1.1.1.4–1.1.1.6 / Table 3, cl. 1.1.1.4–1.1.1.6
M12:M14	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, пп. 1.1.2.1–1.1.2.4; рис. 1, выражение (20), левая часть / Table 3, cl. 1.1.2.1–1.1.2.4; fig. 1, expression (20), left part
M16:M19	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, пп. 1.1.3.1–1.1.3.6 / Table 3, cl. 1.1.3.1–1.1.3.6
M21:M23	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, пп. 1.1.4.1–1.1.4.3 / Table 3, cl. 1.1.4.1–1.1.4.3

Табл. 2 / Table 2

P10:U15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.1 / Table 3, cl. 1.3.1
V10:W15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.2 / Table 3, cl. 1.3.2
X10:Y15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.3 / Table 3, cl. 1.3.3
Z10:AA15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.4 / Table 3, cl. 1.3.4
AB10:AC15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.5 / Table 3, cl. 1.3.5
AD10(AE15)	=ЕСЛИ(ЕОШИБКА(Z10/AB10);»-»;Z10/AB10) / =IF(EERROR(Z10/AB10);»-»;Z10/AB10)	Табл. 4, п. 1.1 / Table 4, cl. 1.1
AF10:AG15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.6 / Table 3, cl. 1.3.6

Продолжение табл. 6 / Continuation of the table 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ / Addresses of worksheet cells ⁽¹⁾	Содержимое / формула / Content / formula	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description
AH10:(AI15)	=ЕСЛИ(ЕОШИБКА(AD10*AF10);"-"; AD10*AF10) / =IF(EERROR(AD10*AF10);»-»; AD10*AF10)	Табл. 4, п. 1.2 / Table 4, cl. 1.2
AJ10:AL15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 2, столбец 4 (слева) / Table 2, column 4 (on the left)
AM10:AM15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 2, столбец 5 (слева) / Table 2, column 5 (on the left)
AN10:AN15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.7 / Table 3, cl. 1.3.7
AO10:AQ15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 2, столбец 6 (слева) / Table 2, column 6 (on the left)
AR10:AR15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 2, столбец 7 (слева) / Table 2, column 7 (on the left)
AS10:AS15	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.3.8 / Table 3, cl. 1.3.8
AT10:AU10	=AN10/AS10	Табл. 4, п. 1.3 / Table 4, cl. 1.3
AT11:AU11	=AN11/(V11*AS11)	Табл. 4, п. 1.4 / Table 4, cl. 1.4
AT12:AU12	=AN12/AS12	Табл. 4, п. 1.3 / Table 4, cl. 1.3
AT13:AU13	=AD13*M17*AN13/(V13*AS13)	Табл. 4, п. 1.5 / Table 4, cl. 1.5
AT14:AU14	=AH14*M17*AN14/(V14*AS14)	Табл. 4, п. 1.6 / Table 4, cl. 1.6
AT15:AU15	=AN15*M12/AS15	Табл. 4, п. 1.7 / Table 4, cl. 1.7
AV10:AW15	Значения элементов исходных данных	Табл. 3, п. 1.3.9 / Table 3, cl. 1.3.9
AX10:(AY15)	=AT10+AV10	Табл. 4, п. 1.8 / Table 4, cl. 1.8

Табл. 3 / Table 3

P28:U36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.1 / Table 3, cl. 1.4.1
V28:V36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.2 / Table 3, cl. 1.4.2
W28:W36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.3 / Table 3, cl. 1.4.3
X28:X36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.4 / Table 3, cl. 1.4.4
Y28:(Y30)	=ОКРУГЛВНИЗ(W28/M\$12;0)	Табл. 4, п. 2.1 / Table 4, cl. 2.1
Y31:Y34	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.5 / Table 3, cl. 1.4.5
Y35	=ОКРУГЛВНИЗ(W35*AH13;0) / =ROUNDINGDOWN(W35*AH13;0)	Табл. 4, п. 2.2 / Table 4, cl. 2.2
Y36	=ОКРУГЛ(W36/AN14*AS14;0) / =ROUNDINGDOWN(W36/AN14*AS14;0)	Табл. 4, п. 2.3 / Table 4, cl. 2.3
Z28:Z36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.6 / Table 3, cl. 1.4.6
AA28:AA36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.7 / Table 3, cl. 1.4.7
AB28:AB36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.8 / Table 3, cl. 1.4.8

Продолжение табл. 6 / Continuation of the table 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ / Addresses of worksheet cells ⁽¹⁾	Содержимое / формула / Content / formula	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description
AC28:(AC30)	=AD28/AB28	Табл. 4, п. 2.4 / Table 4, cl. 2.4
AC31:(AC35)	=ЕСЛИ(ЕОШИБКА(ОКРУГЛВВЕРХ(Y31/AA31;0));0; ОКРУГЛВВЕРХ(Y31/AA31;0)) / =IF(EERROR(ROUNDUP(Y31/AA31;0));0; ROUNDUP(Y31/AA31;0))	Табл. 4, п. 2.5 / Table 4, cl. 2.5
AC36	=ЕСЛИ(ЕОШИБКА(ОКРУГЛВВЕРХ(W36/Z36;0));0; ОКРУГЛВВЕРХ(W36/Z36;0)) / =IF(EERROR (ROUNDUP (W36/Z36;0));0; ROUNDUP(W36/Z36;0))	Табл. 4, п. 2.6 / Table 4, cl. 2.6
AD28:(AD30)	=ОКРУГЛВНИЗ(AH28/\$M\$8;0) / =ROUNDINGDOWN(AH28/\$M\$8;0)	Табл. 4, п. 2.7 / Table 4, cl. 2.7
AD31:(AD36)	=ОКРУГЛ(AC31*AB31;0) / =ROUNDING(AC31*AB31;0)	Табл. 4, п. 2.8 / Table 4, cl. 2.8
AE28:AE36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.9 / Table 3, cl. 1.4.9
AF28:AF35	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.10 / Table 3, cl. 1.4.10
AF36	=AE36*W36/Y36	Табл. 4, п. 2.9 / Table 4, cl. 2.9
AG28:(AG30)	=AE28*W28/X28	Табл. 4, п. 2.10 / Table 4, cl. 2.10
AG31:(AG35)	=AF31*Y31/X31	Табл. 4, п. 2.11 / Table 4, cl. 2.11
AG36	=AE36*W36/X36	Табл. 4, п. 2.10 / Table 4, cl. 2.10
AH28:(AH30)	=\$M\$14*W28	Табл. 4, п. 2.12 / Table 4, cl. 2.12
AH31:(AH36)	=\$M\$8*AD31	Табл. 4, п. 2.13 / Table 4, cl. 2.13
AI28:(AI36)	=СУММ(AG28:AH28) / =SUM(AG28:AH28)	Табл. 4, п. 2.14 / Table 4, cl. 2.14
AJ28:AJ36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.11 / Table 3, cl. 1.4.11
AK28:AK36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.12 / Table 3, cl. 1.4.12
AL28:(AL36)	=AK28*AJ28	Табл. 4, п. 2.15 / Table 4, cl. 2.15
AM28:(AM36)	=AL28/((1+\$M\$9)^\$M\$10)	Табл. 4, п. 2.16 / Table 4, cl. 2.16
AN28:AN36	Значения элементов исходных данных / Values of the source data elements	Табл. 3, п. 1.4.13 / Table 3, cl. 1.4.13
Табл. 4.1 / Table 4.1		
P48:(U56)	=P28	Табл. 3, п. 1.4.1 / Table 3, cl. 1.4.1
V48:(V56)	=ЕСЛИ(AC\$79>0;X48/AC\$79;0) / =IF(AC\$79>0;X48/AC\$79;0)	—
X48:X56	Значения неизвестных переменных (изначально не задаются) / Values of unknown variables (not initially specified)	Табл. 3, п. 2.2 / Table 3, cl. 2.2
Z48:(Z56)	=AM28*X48	—
AB48:(AB56)	=AN28*X48	—
AD48:(AD56)	=Y28*X48	—
AF48:(AF56)	=AI28*X48	—

Продолжение табл. 6 / Continuation of the table 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ / Addresses of worksheet cells ⁽¹⁾	Содержимое / формула / Content / formula	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description
V57	=СУММ(V48:V56) / =SUM(V48:V56)	—
X57	=СУММ(X48:X56) / =SUM(X48:X56)	—
Z57	=СУММ(Z48:Z56) / =SUM(Z48:Z56)	Рис. 1, выражение (13), левая часть / Fig. 1, expression (13), left part
AB57	=СУММ(AB48:AB56) / =SUM(AB48:AB56)	Рис. 1, выражение (7), левая часть / Fig. 1, expression (7), left part
AD57	=СУММ(AD48:AD56) / =SUM(AD48:AD56)	—
AF57	=СУММ(AF48:AF56) / =SUM(AF48:AF56)	Рис. 1, выражение (12), левая часть / Fig. 1, expression (12), left part

Табл. 4.2 / Table 4.2

AJ48(:AO56)	=P28	Табл. 3, п. 1.4.1 / Table 3, cl. 1.4.1
AP48(:AP56)	Значения неизвестных переменных (изначально не задаются) / Values of unknown variables (not initially specified)	Табл. 3, п. 2.1 / Table 3, cl. 2.1
AR48:AR56	=ЕСЛИ(AT\$57>0;AP48/AT\$57;0) / =IF(AT\$57>0;AP48/AT\$57;0)	—
AT48(:AT56)	=AM28*AP48	—
AV48(:AV56)	=AN28*AP48	—
AX48(:AX56)	=Y28*AP48	—
AZ48(:AZ56)	=AI28*AP48	—
BB48(:BB56)	=V48-\$M\$21	Рис. 1, выражение (19), левая часть / Fig. 1, expression (19), left part
BD48(:BD56)	=V48+\$M\$21	Рис. 1, выражение (19), правая часть / Fig. 1, expression (19), right part
AP57	=СУММ(AP48:AP56) / =SUM(AP48:AP56)	—
AR57	=СУММ(AR48:AR56) / =SUM(AR48:AR56)	—
AT57	=СУММ(AT48:AT56) / =SUM(AT48:AT56)	—
AV57	=СУММ(AV48:AV56) / =SUM(AV48:AV56)	—
AX57	=СУММ(AX48:AX56) / =SUM(AX48:AX56)	—
AZ57	=СУММ(AZ48:AZ56) / =SUM(AZ48:AZ56)	Рис. 1, выражение (22), левая часть / Fig. 1, expression (22), left part
BB57	=СУММ(BB48:BB56) / =SUM(BB48:BB56)	—
BD57	=СУММ(BD48:BD56) / =SUM(BD48:BD56)	—

Табл. 5.1 / Table 5.1

P70(:U74)	=P10	Табл. 3, п. 1.3.1 / Table 3, cl. 1.3.1
V69(:V74)	=СУММЕСЛИ(V\$28:V\$36;O69;AD\$48:AD\$56) / =SUMIF(V\$28:V\$36;O69;AD\$48:AD\$56)	Рис. 1, выражения (10) и (11), центральная часть / Fig. 1, expressions (10) and (11), central part
X70(:X74)	=AT10*V\$69	Рис. 1, выражение (11), левая часть / Fig. 1, expression (11), left part
Z70(:Z74)	=AX10*V\$69	Рис. 1, выражение (11), правая часть / Fig. 1, expression (11), right part

Окончание табл. 6 / End of the table 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ / Addresses of worksheet cells ⁽¹⁾	Содержимое / формула / Content / formula	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description
--	--	---

Табл. 5.2 / Table 5.2

AJ70(:AO74)	=P10	Табл. 3, п. 1.3.1 / Table 3, cl. 1.3.1
AP69(:AP74)	=СУММЕСЛИ(V\$28:V\$36;AI69;AX\$48:AX\$56) / =SUMIF(V\$28:V\$36;AI69;AD\$48:AD\$56)	Рис. 1, выражения (20) и (21), центральная часть / Fig. 1, expression (20) and (21), central part
AR70(:AR74)	=AT10*AP\$69	Рис. 1, выражение (21), левая часть / Fig. 1, expression (21), left part
AT70(:AT74)	=AX10*AP\$69	Рис. 1, выражение (21), правая часть / Fig. 1, expression (21), right part

Табл. 6.1 / Table 6.1

AC79	Значение неизвестной переменной (изначально не задается) / Value of unknown variable (not initially specified)	Табл. 3, п. 2.3 / Table 3, cl. 2.3
AC80	=M7*AC79	Рис. 1, выражение (12), правая часть / Fig. 1, expression (12), right part
AC81	=M5*AC\$79	Рис. 1, выражение (10), правая часть / Fig. 1, expression (10), right part
AC82	=M6*AC\$79	Рис. 1, выражение (10), левая часть / Fig. 1, expression (10), left part
AC83	=AB57	Рис. 1, выражение (7), левая часть / Fig. 1, expression (7), left part

Табл. 6.2 / Table 6.2

AW79	=ЕСЛИ(AT57>0;1/AT57;0) / =IF(AT57>0;1/AT57;0)	—
AW80	=M7*AW79	—
AW81(:AW82)	=M5*AW\$79	—
AW83	=ЕСЛИ(AT57>0;AV57/AT57;0) / =IF(AT57>0;AV57/AT57;0)	—

Табл. 7 / Table 7

AQ94	=СУММПРОИЗВ(V48:V56;AN28:AN36) / =SUMOFPRODUCTS(V48:V56;AN28:AN36)	—
AQ95	=СУММПРОИЗВ(V48:V56;AM28:AM36) / =SUMOFPRODUCTS(V48:V56;AM28:AM36)	—
AS94	=AV57	Рис. 1, выражение (14) / Fig. 1, expression (14)
AS95	=AT57	Рис. 1, выражение (15) / Fig. 1, expression (15)
AT94	=(AS94-AQ94)/ABS(AQ94)	—
AT95	=(AS95-AQ95)/AQ95	—
AT96	=\$M22*AU94-\$M23*AU95	Рис. 1, выражение (16), левая часть / Fig. 1, expression (16), left part

Примечание / Note:

⁽¹⁾абстрактное обозначение A1(:B10) означает, что в ячейку A1 необходимо ввести формулу, указанную в соответствующем столбце таблицы, после чего полученный результат «растянуть» (скопировать) до ячейки B10 / abstract designation A1(:B10) means that the formula specified in the corresponding column of the table must be entered into cell A1, after which the result must be “stretched” (copied) to cell B10.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Таблица 2. Исходные данные в части категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству									
	№ п.п.																							
	Наименование параметра																							
	1 Общие параметры локации																							
	1.1	Максимальное количество проживающих в локации																						
	1.2	Минимальное количество проживающих в локации																						
	1.3	Общая площадь земельного участка																						
	1.4	Площадь парковочного места (с учетом проезда)																						
	1.5	Ставка дисконтирования																						
	1.6	Номинальный срок строительства																						
	2 Параметры объектов жилищного строительства																							
	2.1	Удельная площадь объекта (в расчете на количество проживающих)																						
	2.2	Доля площади земельного участка в общей площади жилых помещений																						
	2.3	Доля площади парковочных мест в общей площади жилых помещений																						
	3 Параметры объектов, не относящихся к жилищному строительству																							
	3.1	Период для анализа посещаемости объекта																						
	3.2	Максимальное количество посещений одним человеком объекта за период																						
	3.3	Удельные затраты на аренду торговых помещений																						
	3.4	Удельные затраты на коммунальные услуги для торговых помещений																						
	4 Параметры процедуры решения задачи																							
	4.1	Максимальное отклонение фактического значения количества объектов от расчетного																						
	4.2	Коэф-т важности учета критерия суммарного дисконтир. денежного потока																						
	4.3	Коэф-т важности учета критерия суммарных капитальных затрат																						
	24																							
	25																							
	26																							
	27																							
	28																							
	29																							
	30																							
	31																							
	32																							
	33																							
	34																							
	35																							
	36																							
	37																							

Номер категории	Наименование категории объектов, не относящихся к жилищному строительству	Среднее количество посещений объекта одним человеком за период	Наименование элемента сервисной площади
1	Жилая	9	—
2	Образовательное учреждение среднего образования	—	—
3	Учреждение здравоохранения	8	—
4	Детское дошкольное учреждение	—	—
5	Физкультурно-оздоровительный комплекс (плав. бассейн)	45	дорожка
6	Торговый комплекс	40	секция
7	Паркинг	—	—

Таблица 3. Исходные данные и расчетные характеристики экземпляров объектов строительства для возведения в рамках рассматриваемого земельного участка									
№ п.п.	Наименование	Индекс категории	Общая площадь единицы экземпляра	Проектная емкость единицы экземпляра					
1	Жилая дом - монолит - 238 квартир	1	14823,8	17					
2	Жилой дом - монолит - 45 квартир	1	3574,9	9					
3	Жилой дом - монолит - 94 квартиры	1	6695,2	14					
4	Школа серия 222-1-1ДГ	2	8844,7	4					
5	Школа проект 12252.11	2	8235,2	4					
6	Политехника проект Р	3	6452,3	4					
7	Детское дошкольное учреждение	4	1321,2	2					
8	Спортивный комплекс - плавательный бассейн	5	1703,7	1					
9	Торговый комплекс	6	1872,2	3					

Рис. 2. Общий вид рабочего листа книги Microsoft Excel, созданного в рамках реализации методики на практическом примере (начало)

Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ																																																																																																																				
1																																																																																																																																														
2	Номинальное количество человек, обслуживаемое на элементе сервисной площади	Размер элемента сервисной площади	S^d м ² /ед.	h^d чел./м ²	γ^d	Удельное количество человек, обслуживаемое на сервисной площади	h_j чел./м ²	Ключевой показатель				База ключевого показателя								Минимальная (нормативная) удельная емкость объекта	Допустимый диапазон изменения удельной емкости	Максимальная удельная емкость объекта																																																																																																																								
3								Удельное количество человек, обслуживаемое на общей площади	Категория	Ед.изм.	Нормат. значение	Категория	Ед.изм.	Нормат. значение	Категория	Ед.изм.	Нормат. значение																																																																																																																													
4																																																																																																																																														
5																																																																																																																																														
6																																																																																																																																														
7																																																																																																																																														
8																																																																																																																																														
9	S^d м ² /ед.	h^d чел./м ²	γ^d	h_j чел./м ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
13	10	50	0,2	0,14	0,028	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь	сервисная площадь																																																																																																																					
14	2	12	0,166666667	0,8	0,133333333	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь	общая площадь																																																																																																																					
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																					
19	Проектная емкость парковочных мест для единицы	Коэффициент пересчета коэффициента парков. мест	Количество парковочных мест для единицы	Количество парковочных мест для единицы	Количество парковочных мест для единицы	Количество парковочных мест для единицы	Количество парковочных мест для единицы	Количество парковочных мест для единицы	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																																				
20																											Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																												
21																																																			Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																					
22																																																																										Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																														
23																																																																																																	Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																							
24																																																																																																																								Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.
25																																																																																																																																														
26	Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																																							
27																								Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																
28																																															Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																									
29																																																																						Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																		
30																																																																																													Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																											
31																																																																																																																				Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.				
32	Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																																							
33																								Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																
34																																															Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																									
35																																																																						Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																		
36																																																																																													Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																											
37																																																																																																																				Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.				
38	Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.																																																																																																																							
39																								Площадь земельного участка для единицы экземпляра	Коэффициент пересчета	Первоначальная стоимость единицы экземпляра	Капитальные затраты на возведение екз-мп-ля	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный поток для экз.	Дисциплинирующий денеж-ный																																																																																																				

Рис. 2. Общий вид рабочего листа книги Microsoft Excel, созданного в рамках реализации методики на практическом примере (продолжение)

	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
39	Таблица 4.1. Незвестные переменные и расчетные характеристики комплекса объектов строительства (предварительное обоснование)																		
40	№ п.п.	Наименование экземпляра объекта строительства																	
41		Расчетное количество																	
42		Расчетное отношение кол-ва к суммарным капитальным затратам																	
43		Произведение относительного показателя и капитальных затрат																	
44		Произведение относительного показателя и дисконтированного денежного потока																	
45	<i>i</i>	-	z_i/z_0	ед.	z_i	тыс.руб.	$K_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$CF_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$H_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$S_i^1 \cdot z_i$	тыс.руб.					
46	-	-	ед.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
47	1	Жилой дом - монолит - 238 квартир	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
48	2	Жилой дом - монолит - 45 квартир	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
49	3	Жилой дом - монолит - 94 квартиры	32,34501	2,70386E-06	0,732647	0,004089	0,001989	0,036808	0,001003	0,00012	0,00012	0,001302	0,001416						
50	4	Школа серия 222-1-1ЛП	1,743341	1,45733E-07	0	0	0	-0,00513	0	0	0	0	0						
51	5	Школа проект 12252.11	1,89576	1,58475E-07	0,019898	0,039369	-0,03747	0,000349	0	0	0	0	0						
52	6	Поликлиника проект Р	6,1	5,0925E-07	0,039369	0,000543	-0,04938	0,001163	0	0	0	0	0						
53	7	Детское дошкольное учреждение	20,70922	1,73117E-06	0,200543	0,003454	-0,24617	0,003438	0	0	0	0	0						
54	8	Спортивный комплекс - плавательный бассейн	1,778044	1,48634E-07	0,003454	0,000994	0,000564	0,000994	0,000564	0,000994	0,000994	0,018708	0,000994						
55	9	Торговый комплекс	64,57138	5,39779E-06	1	1	-0,30078	0,002299	0,002299	0,002299	0,002299	0,026375	0,002299						
56	Суммарное значение																		
57																			
58																			
59																			
60	Таблица 5.1. Агрегированные расчетные характеристики для различных категорий возводимых объектов (предварительное обоснование)																		
61	Номер категории	Наименование категории объектов строительства																	
62		Сумма произведений показателей и проектных мощностей																	
63		Минимально допустимое значение агрегированного производства																	
64		Максимально допустимое значение агрегированного производства																	
65		Произведение относительного показателя и агрегированного производства																	
66	<i>j</i>	-	$\sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	ед.	$\alpha^{min} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$\alpha^{max} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$\alpha^{min} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$\alpha^{max} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	тыс.руб.	$\alpha^{min} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot z_i$	тыс.руб.					
67	-	-	ед.	0,001003	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012						
68	1	Объект жилищного строительства	0,001003	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012						
69	2	Образовательное учреждение среднего образования	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012						
70	3	Учреждение здравоохранения	3,96E-05	3,96186E-05	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692	0,000692						
71	4	Детское дошкольное учреждение	6,12E-05	6,1191E-05	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713	0,000713						
72	5	Физкультурно-оздоровительный комплекс (плав. бассейн)	8,14E-05	8,1365E-05	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733	0,000733						
73	6	Торговый комплекс	0,000994	0,000341733	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994	0,000994						
74																			
75																			
76																			
77	Таблица 6.1. Агрегированные расчетные характеристики структуры комплекса объектов строительства (предварительное обоснование)																		
78	Наименование показателя																		
79	№ п.п.	Обознач.																	
80	1	Расчетное обратное значение суммарных капитальных затрат	z_0															Ед. изм.	Значение
81	2	Отношение общей площади земельного участка к суммарным капитальным затратам	$S^{1max} \cdot z_0$															тыс.руб. ⁻¹	8,36E-08
82	3	Отношение максим. кол-ва проживающих в локации к суммарным капитальным затратам	$H^{max} \cdot z_0$															м ² /тыс.руб.	0,083594
83	4	Отношение миним. кол-ва проживающих в локации к суммарным капитальным затратам	$H^{min} \cdot z_0$															чел./тыс.руб.	0,001003
84	5	Индекс рентабельности (PI)	$\sum_i CF_i \cdot z_i$															чел./тыс.руб.	0,000502
85			-															-	-0,30078

Рис. 2. Общий вид рабочего листа книги Microsoft Excel, созданного в рамках реализации методики на практическом примере (продолжение)

AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	
Таблица 4.2. Незвестные перечисленные и расчетные характеристики комплекса объектов строительства (окончательное обоснование)																							
№ п.п.	Наименование экземпляра объекта строительства										Фактическое количество	Фактическое отношение кол-ва к суммарным капитальным затратам	Капитальные затраты	Дисконтированный денежный поток	Проектная емкость	Площадь земельного участка		Предельно допустимое количество					
i	-	-	-	-	-	-	x _i	z _i	ед.	тыс.руб.	K _i ·x _i	тыс.руб.	CF _i ·x _i	тыс.руб.	H _i ·x _i	чел.	S ¹ ·x _i	м²	x ^{min}	x ^{max}			
-	-	-	-	-	-	-	ед.	тыс.руб.	тыс.руб.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	ед.	ед.		
1	Жилой дом - монолит - 238 квартир	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	2		
2	Жилой дом - монолит - 45 квартир	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	2		
3	Жилой дом - монолит - 94 квартиры	50	31	2,69321E-06						8399873		42009,6		11501			16233,47		30,34501		34,34501		
4	Школа серия 222-1-1ПГ	44	2	1,73755E-07						56114,27		-70389,74		1652			17868		-0,256659		3,743341		
5	Школа проект 1252.11	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	2		
6	Полкинина проект Р	53	2	1,73755E-07						251124,8		-472912,3		500			4400		-40,10424		3,89576		
7	Детское дошкольное учреждение	54	6	5,21266E-07						463234,1		-581080,9		720			13680		4,1		8,1		
8	Спортивный комплекс - плавательный бассейн	55	20	1,73755E-06						2316844		-2843973		940			39720		18,70922		22,70922		
9	Торговый комплекс	56	1	8,68777E-08						22241,4		3794,137		6886			125863,3		-0,221956		3,778044		
Суммарное значение		57	62	5,38642E-06						11510432		-3542552		21999			217764,8		46,57138		82,57138		
58																							
59																							
Таблица 5.2. Агрегированные расчетные характеристики для различных категорий возводимых объектов (окончательное обоснование)																							
номер кате-гории	Наименование категории объектов строительства										Суммарная проектная мощность	Минимально допустимое значение суммар. проектной мощности	Максимально допустимое значение агрегированного произведения										
i	-	-	-	-	-	-	Σ _{i ∈ I_j} H _i · x _i	α ^{min} · Σ _{i ∈ I_j} H _i · x _i	чел.	чел.	чел.	α ^{max} · Σ _{i ∈ I_j} H _i · x _i											
-	-	-	-	-	-	-	чел.	чел.	чел.	чел.	чел.												
1	Объект жилищного строительства	67	11501				-			-		8855,77											
2	Образовательное учреждение среднего образования	69	1652				1380,12					7929,882											
3	Учреждение здравоохранения	70	500				454,231995					8177,211											
4	Детское дошкольное учреждение	71	720				701,561					8408,509											
5	Физкультурно-оздоровительный комплекс (плав. бассейн)	72	940				932,858889					11393,66											
6	Торговый комплекс	73	6886				3918,007333																
74																							
75																							
76																							
77																							
Таблица 6.2. Агрегированные расчетные характеристики структуры комплекса объектов строительства (окончательное обоснование)																							
№ п.п.	Наименование показателя										Обознач.	Ед. изм.	Значение										
1	Расчетное обратное значение суммарных капитальных затрат										1/(Σ K _i · x _i)	тыс.руб. ⁻¹	8,09E-08										
2	Отношение общей площади земельного участка к суммарным капитальным затратам										S ^{зем} /(Σ K _i · x _i)	м²/тыс.руб.	0,086878										
3	Отношение максим. кол-ва проживающих в локации к суммарным капитальным затратам										H ^{max} /(Σ K _i · x _i)	чел./тыс.руб.	0,001043										
4	Отношение миним. кол-ва проживающих в локации к суммарным капитальным затратам										H ^{min} /(Σ K _i · x _i)	чел./тыс.руб.	0,000521										
5	Индекс рентабельности (PI)										(Σ CF _i · x _i) / (Σ K _i · x _i)	-	-0,407769										
84																							
85																							
86																							
Таблица 7. Расчетные критерияльные характеристики комплекса объектов строительства (окончательное обоснование)																							
№ п.п.	Наименование характеристики										Обознач.	Значение		Относительное отклонение фактического значения от расчетного									
												расчетное	фактическое										
i	-	-	-	-	-	-	V _i	V _i ⁰	V _i	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	(V _i - V _i ⁰) / V _i ⁰										
-	-	-	-	-	-	-	-	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.											
1	Суммарный дисконтированный денежный поток										CF	-3598143	-3542552	-0,01545									
2	Суммарные капитальные затраты										K	11962553	11510432	-0,037795									
3	Обобщенный критерий										Z	-	-	0,011172									

Рис. 2. Общий вид рабочего листа книги Microsoft Excel, созданного в рамках реализации методики на практическом примере (окончание)

Табл. 7. Настройки для надстройки «Поиск решения» программы Microsoft Excel, используемые в процессе реализации методики

Table 7. Settings for the “Solution Search” add-in of Microsoft Excel, used in the process of implementation of the methodology

Элемент настройки / Setting element	Оптимизационная модель для предварительного обоснования (блок 4.1 схемы на рис. 1) / Optimization model for preliminary substantiation (block 4.1 of the diagram at fig. 1)		Оптимизационная модель для окончательного обоснования (блок 4.4 схемы на рис. 1) / Optimization model for final substantiation (block 4.4 of the diagram at fig.	
	Значение / Value	Структурный элемент математического описания / Structural element of mathematical description	Значение / Value	Значение / Value
Целевая ячейка / Target cell	AC83	Выражение (7) / Expression (7)	AU96	Выражение (16) / Expression (16)
Тип задачи оптимизации / Type of optimization task	Максимизация / Maximization		Максимизация / Maximization	
Ячейки переменных	X48:X56;AC79	Табл. 3, пп. 2.2, 2.3 / Table 3, cl. 2.2, 2.3	AP48:AP56	Табл. 3, п. 2.1 / Table 3, cl. 2.1
Ограничения	X48:X56 >= 0	Выражение (8) / Expression (8)	AP48:AP56 >= 0	Выражение (17) / Expression (17)
	AC79 >= 0	Выражение (9) / Expression (9)	AP48:AP56 = целое	Выражение (18) / Expression (18)
	V69 >= AC82	Выражение (10), левая часть / Expression (10), left part	AP48:AP56 >= BB48:BB56	Выражение (19), левая часть / Expression (19), left part
	V69 <= AC81	Выражение (10), правая часть / Expression (10), right part	AP48:AP56 <= BD48:BD56	Выражение (19), правая часть / Expression (19), right part
	V70:V74 >= X70:X74	Выражение (11), левая часть / Expression (11), left part	AP69 >= M6	Выражение (20), левая часть / Expression (20), left part
	V70:V74 <= Z70:Z74	Выражение (11), правая часть / Expression (11), right part	AP69 <=M5	Выражение (20), правая часть / Expression (20), right part
	AF57 <= AC80	Выражение (12) / Expression (12)	AP70:AP74 >= AR70:AR74	Выражение (21), левая часть / Expression (21), left part
	Z57 = 1	Выражение (13) / Expression (13)	AP70:AP74 <= AT70:AT74	Выражение (21), правая часть / Expression (21), right part
	AZ57 <= M7		Выражение (22) / Expression (22)	
Метод поиска решения	Поиск решения линейных задач симплекс-методом / Search for the solution of linear problems by simplex method	—	Поиск решения линейных задач симплекс-методом / Search for the solution of linear problems by simplex method	—

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку вышеописанные результаты являются адекватными, в отношении разработанного инструментального средства — методики — был сделан вывод о его высокой практической значимости, что, вкупе с возможностью реализации методики с использованием стандартных алгоритмов реализации моделей линейной оптимизации в рамках современных программных сред (Microsoft Excel, Mathcad, Matlab), делает методику эффективным инструментом для решения широкого круга задач в области обоснования характеристик инвестиционно-строительных проектов.

Разработанная методика имеет следующие ключевые особенности:

- разработанное инструментальное средство может быть использовано в общем случае для любого набора категорий объектов, не относящихся к жилищному строительству, несмотря на то, что в основных положениях методики указан довольно ограниченный набор категорий;
- значения коэффициентов значимости учета критериев суммарного дисконтированного денежного потока и суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов строительства, фигурирующие в составе исходных данных (пп. 1.1.4.2 и 1.1.4.3 табл. 3), могут быть рассчитаны на основе системы уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{\Delta^{CF}}{\Delta^K} = \frac{|CF_{\Sigma}^0|}{K_{\Sigma}^0} = \frac{w^K}{w^{CF}}; \\ w^{CF} + w^K = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где Δ^{CF} , Δ^K — абсолютное отклонение текущего значения (вычисляемое в рамках оптимизационной модели для окончательного обоснования характе-

ристик комплекса объектов строительства, определяемой выражениями (16)–(22) на рис. 1) соответственно суммарного дисконтированного денежного потока и суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов строительства от предварительного; CF_{Σ}^0 , K_{Σ}^0 — предварительное значение соответственно суммарного дисконтированного денежного потока и суммарных капитальных затрат на возведение комплекса объектов строительства, определяемое выражением (14) или (15) на рис. 1.

По результатам решения указанной системы уравнений получим:

$$w^{CF} = \frac{K_{\Sigma}^0}{|CF_{\Sigma}^0| + K_{\Sigma}^0}; \quad w^K = \frac{|CF_{\Sigma}^0|}{K_{\Sigma}^0 + |CF_{\Sigma}^0|}. \quad (2)$$

Также следует отметить, что предложенная методика предусматривает ряд недостатков (допущений), несколько ограничивающих область эффективного применения разработанного инструментального средства. К основным из указанных недостатков относятся следующие:

- отсутствие непосредственного учета особенностей транспортной инфраструктуры в рамках рассматриваемого комплекса объектов строительства, в том числе в части площади планируемых под застройку земельных участков;
- отсутствие учета ограниченных объемов технологических ресурсов и их влияния на сроки строительства, и, как следствие, на ключевые экономические показатели строительного проекта.

Именно поэтому на дальнейших этапах исследования планируется модификация структуры оптимизационных моделей, предусмотренных в рамках предложенной методики, с целью учета дополнительных факторов для устранения вышеуказанных недостатков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евсеева Е.И. Современные проблемы развития жилищного строительства в России // Приволжский научный вестник. 2015. № 6–2 (46). С. 16–18.
2. Ракова В.А. Современные тенденции и проблемы развития жилищного строительства в России // Символ науки. 2016. № 5–1. С. 186–188.
3. Кожухарь А.О. Анализ проблем и основных тенденций развития жилищного строительства в России // Проблемы экономики и менеджмента. 2016. № 12 (64). С. 46–49.
4. Джамалов А.С., Бекбузаров М.А. Современные проблемы развития жилищного комплекса в Российской Федерации // Региональная экономика: теория и практика. 2009. № 22. С. 44–46.
5. Селютина Л.Г., Малеева Т.В. Модели реализации комплексных программ жилищного стро-

- ительства и реконструкции жилой застройки // Теория и практика общественного развития. 2013. № 5. С. 241–243.
6. Светлаков В.И., Мохов А.И. Модель цикла комплексного развития территории // Вестник Евразийской науки. 2014. № 6 (25). С. 68.
7. Ощерин Л.А., Пешкова М.В. Методические подходы к разработке концепции инновационного развития территорий, как основы лэнд-девелопмента в жилищном строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 1 (1). С. 10–20.
8. Ильина И.Н. Инновационные подходы к формированию моделей комплексного инвестиционного градостроительного развития городских тер-

риторий // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2017. № 1 (184). С. 16–25.

9. *Илющенко Н.А.* Государственно-частное партнерство в комплексном развитии территорий // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. 2010. № 4. С. 53–57.

10. *Малицкая Е.А.* Программно-целевой подход в управлении проектами комплексного развития территории // Вестник Института экономики РАН. 2016. № 2. С. 56–68.

11. *Ptuhina I., Spiridonova T., Musorina T., Kanyukova S., Rezvaia A.* Efficiency of urban development under high-rise construction of districts // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53. P. 01049. DOI: 10.1051/mateconf/20165301049

12. *Gamayunova O., Gumerova E.* Solutions to the urban problems by using of underground space // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1637–1642. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.904

13. *Zaborova D.D., Strelets K.I., Bonivento Bruges J., Asylgaraeva M.I., de Andrade Romero M., Steffan C.* Engineering solutions for the social housing, integrated into urban environment // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4 (80). С. 104–118. DOI: 10.18720/MCE.80.10

14. *Фатхриева Д.И., Рахматуллина Е.С.* Комплексное освоение и развитие крупных земельных участков // Иннов: электронный научный журнал. 2018. № 3 (36). С. 2.

15. *Гиясов Б.И.* Влияние развития инфраструктуры городов на жилую среду // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 17–21.

16. *Султанова И.П.* Анализ методов планирования, управления и разработки организационно-технологических решений в проектах капитального строительства // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 127–136.

17. *Gamayunova O., Vatin N.* Education in the field of construction of unique, high-rise and long-span buildings and constructions // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1065–1069. Pp. 2459–2462. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.2459

18. *Куценко Д.И., Набока А.А., Петроченко М.В.* Совершенствование методики технологического и ценового аудита инвестиционно-строительных проектов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 5 (68). С. 62–74. DOI: 10.18720/CUBS.68.6

19. *Кудреватых В.В.* Исследование особенностей инструментария оценки и развития проектно-ориентированного управления в инжиниринговой компании полного цикла // Вестник МГСУ. 2019. № 5 (128). С. 634–649. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.634-649

20. *Речинский А.В., Стрелец К.И.* Повышение квалификации по проектированию и строительству особо опасных, технически сложных и уникальных

объектов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 1 (1). С. 74–76.

21. *Petrochenko M.V., Velichkin V.Z., Kazakov Y.N., Zavodnova Y.B.* Reliability assessment of the construction schedule by the critical chain method // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5 (81). С. 25–31. DOI: 10.18720/MCE.81.3

22. *Гусакова Е.А.* Направления прогнозного анализа жизненного цикла проектов девелопмента недвижимости // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 9 (132). С. 1196–1204. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1196-1204

23. *Сарченко В.И.* Подходы к оценке инвестиционного потенциала городских территорий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8 (103). С. 202–213.

24. *Поршакова А.Н., Баронин С.А.* Экономическая надежность девелопмента комплексной жилой застройки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2010. № 4 (16). С. 177–183.

25. *Novikova V., Nikolaeva O.* To Issue of Mathematical Management Methods Applied for Investment-Building Complex under Conditions of Economic Crisis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262. P. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012074

26. *Meharie M.G., Gariy Z.C.A., Mutuku R.N.N., Mengesha W.J.* An Effective Approach to Input Variable Selection for Preliminary Cost Estimation of Construction Projects // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2019/4092549

27. *Canesi R., Marella G.* Residential construction cost: An Italian survey // Data in Brief. 2017. Vol. 11. Pp. 231–235. DOI: 10.1016/j.dib.2017.02.005

28. *Ji S.-H., Ahn J., Lee H.-S., Han K.* Cost Estimation Model Using Modified Parameters for Construction Projects // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2019/8290935

29. *Park M., Chu Y., Lee H.-S., Kim W.* Evaluation methods for construction projects // Journal of Civil Engineering and Management. 2009. Vol. 15. Issue 4. Pp. 349–359. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.349-359

30. *Nanyama N., Basua R., Sawhneya A., Prasad J.K.* Selection framework for evaluating housing technologies // Procedia Engineering. 2015. Vol. 123. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.044

31. *Кобзев В.В., Радаев А.Е., Кривченко А.С.* Математическое моделирование производственных систем: монография. СПб.: Издательство: Политехнический университет, 2014. 239 с.

Поступила в редакцию 16 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Екатерина Михайловна Попова** — студентка магистратуры по направлению «Строительство» (профиль «Организация и управление инвестиционно-строительными проектами»), Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194356, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6784-1340, ORCID: 0000-0001-8939-3135; pmkate1210@mail.ru;

Ирина Станиславовна Птухина — кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194356, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; PИИЦ ID: 623323, Scopus: 56233473000, ResearcherID: AAG-8093-2020, ORCID: 0000-0003-0054-2793, Google Scholar ID: RqaDS3UAAAAJ; ptuhina_is@spbstu.ru;

Антон Евгеньевич Радаев — кандидат технических наук, кандидат экономических наук, доцент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194356, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; PИИЦ ID: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828, Google Scholar ID: pfW9lTYAAAAJ; radaev_ac@spbstu.ru.

REFERENCES

1. Evseeva E.I. Actual problems of development of housing construction in Russia. *Volga Scientific Bulletin*. 2015; 6-2(46):16-18. (rus.).
2. Rakova V.A. Current trends and problems in the development of housing in Russia. *Symbol of Science*. 2016; 5-1:186-188. (rus.).
3. Kozhukhar A.O. Analysis of the problems and main trends in the development of housing construction in Russia. *Problems of Economics and Management*. 2016; 12(64):46-49. (rus.).
4. Dzhamalov A.S., Bekbuzarov M.A. Modern problems of housing development in the Russian. *Regional economics: theory and practice*. 2009; 22:44-46. (rus.).
5. Selyutina L.G., Maleeva T.V. Implementation models of the complex programs for the housing development and residential reconstruction. *Theory and Practice of Social Development*. 2013; 5:241-243. (rus.).
6. Svetlakov V.I., Mokhov A.I. A model of cycle of complex development of the territory. *Bulletin of Eurasian Science*. 2014; 6(25):68. (rus.).
7. Oshcherin L.A., Peshkova M.V. Methodological approach to the concept of territories innovation development as the foundation of land development in housing construction. *University News. Investments. Construction. The property*. 2011; 1(1):10-19. (rus.).
8. Il'ina I.N. Innovative approaches in modeling complex urban investment projects for city development. *Property Relations in the Russian Federation*. 2017; 1(184):16-25. (rus.).
9. Ilyushchenko N.A. Public-private partnership in the integrated development of territories. *Bulletin of the Adygea State University. Series 5: Economy*. 2010; 4:53-57. (rus.).
10. Malickaya E.A. Program and target approach in project management for complex territory development. *Bulletin of the Institute of Economics, Russian Academy of Sciences*. 2016; 2:56-68. (rus.).
11. Ptuhina I., Spiridonova T., Musorina T., Kanyukova S., Rezvaia A. Efficiency of urban development under high-rise construction of districts. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 53:01049. DOI: 10.1051/mateconf/20165301049
12. Gamayunova O., Gumerova E. Solutions to the urban problems by using of underground space. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1637-1642. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.904
13. Zaborova D.D., Strelets K.I., Bonivento Bruges J., Asylgaraeva M.I., de Andrade Romero M., Stefan C. Engineering solutions for the social housing, integrated into urban environment. *Civil Engineering Journal*. 2018; 4(80):104-118. DOI: 10.18720/MCE.80.10
14. Fathrieva D.I., Rahmatullina E.S. The integrated development of large land property. *Innov: Electronic Scientific Journal*. 2018; 3(36):2. (rus.).
15. Giyasov B.I. Influence produced by the urban infrastructure development on the living environment. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 4:17-21. (rus.).
16. Sultanova I.P. Analysis of planning, management and development methods of organizational and technological solutions in infrastructure projects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 7:127-136. (rus.).
17. Gamayunova O., Vatin N. Education in the field of construction of unique, high-rise and long-span buildings and constructions. *Advanced Materials Re-*

search. 2015; 1065-1069:2459-2462. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.2459

18. Kucenko D.I., Naboka A.A., Petrochenko M.V. Methods improvement of technological and price audit for construction investment projects. *The Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 5(68):62-74. DOI: 10.18720/CUBS.68.6 (rus.).

19. Kudrevatykh V.V. Research of the toolkit features for the evaluation and development of project-oriented management in a full cycle engineering company. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(5):634-649. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.634-649 (rus.).

20. Rechinskij A.V., Strelec K.I. Professional development for design and construction of especially dangerous, technically difficult and unique objects. *The Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012; 1(1):74-76. (rus.).

21. Petrochenko M.V., Velichkin V.Z., Kazakov Y.N., Zavodnova Y.B. Reliability assessment of the construction schedule by the critical chain method. *Civil Engineering Journal*. 2018; 5(81):25-31. DOI: 10.18720/MCE.81.3

22. Gusakova E.A. Directions for the forecast analysis of the life cycle of real estate development projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(9):(132):1196-1204. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1196-1204 (rus.).

23. Sarchenko V.I. Approaches to urban area investment potential evaluation. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015; 8(103):202-213. (rus.).

24. Porshakova A.N., Baronin S.A. Economic reliability of development of integrated residential devel-

opment. *News of higher educational institutions. Volga region. Social Sciences*. 2010; 4:177-183. (rus.).

25. Novikova V., Nikolaeva O. To Issue of Mathematical Management Methods Applied for Investment-Building Complex under Conditions of Economic Crisis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 262:012074. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012074

26. Meharie M.G., Gariy Z.C.A., Mutuku R.N.N., Mengesha W.J. An Effective Approach to Input Variable Selection for Preliminary Cost Estimation of Construction Projects. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-14. DOI: 10.1155/2019/4092549

27. Canesi R., Marella G. Residential construction cost: An Italian survey. *Data in Brief*. 2017; 11:231-235. DOI: 10.1016/j.dib.2017.02.005

28. Ji S.-H., Ahn J., Lee H.-S., Han K. Cost Estimation Model Using Modified Parameters for Construction Projects. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-10. DOI: 10.1155/2019/8290935

29. Park M., Chu Y., Lee H.-S., Kim W. Evaluation methods for construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009; 15(4):349-359. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.349-359

30. Nanyama N., Basua R., Sawhneya A., Prasad J.K. Selection framework for evaluating housing technologies. *Procedia Engineering*. 2015; 123:333-341. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.044

31. Kobzev V.V., Radaev A.E., Krivchenko A.S. *Mathematical Modeling of Production Systems: monograph*. Saint-Petersburg, Publisher: Polytechnic University, 2014; 239. (rus.).

Received April 16, 2020.

Adopted in a revised form on May 7, 2020.

Approved for publication May 28, 2020.

B I O N O T E S: **Ekaterina M. Popova** — student in the field of “Construction” (profile “Organization and management of investment and construction projects”), Higher School of Industrial and Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 194356, Russian Federation; SPIN-code: 6784-1340; pmkate1210@mail.ru;

Irina S. Ptukhina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Higher School of Industrial-Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 194356, Russian Federation; ID RISC: 623323, Scopus: 56233473000, ResearcherID: AAG-8093-2020, ORCID: 0000-0003-0054-2793, Google Scholar ID: RqaDS3UAAAAJ; ptuhina_is@spbstu.ru;

Anton E. Radaev — Candidate of Technical Sciences, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Higher School of Industrial and Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 194356, Russian Federation; ID RISC: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828, Google Scholar ID: pfW9ITYAAAAJ; radaev_ae@spbstu.ru.