

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том 16 выпуск 2 (60)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ

Учредитель и издатель журнала — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

RESEARCH AND PRACTICE ONLINE JOURNAL

Founder and publisher of the journal — Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)” (MGSU)

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-63118 от 18 сентября 2015 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

До 27 июля 2012 г. журнал назывался «Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование».

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 8
Издательство МИСИ – МГСУ
(«Строительство: наука и образование»)

Основан в марте 2011 г.
Первый номер вышел в июле 2011 г.
Периодичность выхода — ежеквартальная

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Выпускающий редактор *А.Р. Табекова*
редактор *Т.В. Бердникова*
администратор сайта журнала *Н.А. Милованова*
корректор выпусков журнала *О.В. Ермихина*
дизайнер-верстальщик журнала *А.Ю. Байкова*
переводчик *О.В. Юденкова*

EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

MISI – MGSU Publishing house
(Construction: Science and Education)
26 Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Founded in March, 2011.
The first issue was released in July, 2011.
Periodicity of publication — quarterly

EDITORIAL STAFF:

A.R. Tabekova Executive editor
T.V. Berdnikova Editor
N.A. Milovanova Journal Website Manager
O.V. Ermikhina Corrector of Journal Issues
A.Y. Baykova Layout Designer
O.V. Yudenkova Translator

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, НИУ МГСУ,
Издательство МИСИ – МГСУ («Строительство: наука и образование»),
e-mail: nso-journal@mgsu.ru (для официальной переписки), <http://www.nso-journal.ru>

Подписано в свет 30.06.2026.
Гарнитура Таймс.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)
Издательство МИСИ – МГСУ.
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26
www.mgsu.ru, editorial_office@mgsu.ru, Тел. (495) 287-49-14, доб. 2476

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

Журнал включен и индексируется в базе данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования, www.elibrary.ru) на условиях полнотекстового размещения, архивирования и депозитного хранения.

Directory of Open Access Journals — DOAJ (<http://www.doaj.org>).

Научная библиотека открытого доступа «Кибер-Ленинка». НИУ МГСУ предоставил лицензию на размещение материалов журнала «Строительство: наука и образование» EBSCO Information Services (<http://www.ebsco.com/>) — крупнейшему в мире агрегатору полнотекстовых журналов и других источников научной информации. Полные тексты выпусков журнала можно будет найти в обновленной базе данных EBSCO Applied Sciences («Прикладные науки»), как только коллекция будет укомплектована и размещена на сайте агрегатора. Распространяется через электронные библиотеки «Лань», «Руконт», «IPRbooks», входит в каталог компании East View Information Services, Inc. Статьям присваивается цифровой идентификатор DOI.

INDEXING

The journal is included (digital archiving, deposit and delivery to users on an agreement for a MGSU) in the database of Russian Science Citation Index (RSCI), supported by the Scientific Electronic Library www.elibrary.ru on terms of full text placement.

Indexed by Directory of Open Access Journals — DOAJ (<http://www.doaj.org>).

Russian open access scientific library CyberLeninka. Moscow State University of Civil Engineering has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Information Services (<http://www.ebsco.com/>), the world's most prolific aggregator of full text journals, magazines and other sources. The full text of Construction: Science and Education will be found on EBSCO's upgraded Applied Sciences database once the collection is complete.

Distributed through electronic libraries “Lan”, “Rukont”, “IP Rbooks”, journal is included to the catalog of company East View Information Services, Inc.

The articles are assigned a digital identifier DOI.

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

Королев Евгений Валерьевич, зам. главного редактора, д-р техн. наук, проф., проректор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Сидоров Владимир Николаевич, зам. гл. редактора, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Россия

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

Анискин Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф., директор Института гидротехнического и энергетического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Гагарин Владимир Геннадьевич, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

Кантаржи Исмаил Григорьевич, д-р техн. наук, проф., проф. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Маилян Левон Рафаэлович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. автомобильных дорог, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

Пустовгар Андрей Петрович, канд. техн. наук, доц., научный руководитель НИИ строительных материалов и технологий, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Соловьев Алексей Кириллович, д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования зданий и сооружений, НИУ МГСУ, Москва, Россия

EDITORIAL BOARD

Alexander R. Tusnin, Editor-in-Chief, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, MGSU, Moscow, Russian Federation

Evgeniy V. Korolev, Deputy Editor-in-Chief, DSc in engineering, Professor, Vice-Rector, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Vladimir N. Sidorov, Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the RAASN, Head of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, MGSU Moscow, Russian Federation

Yuri V. Alekseev, Doctor of Architecture, Professor, Department of Urban Development, MGSU, Moscow, Russian Federation

Nikolay A. Aniskin, DSc in engineering, Professor, Director of the Institute of Hydrotechnical and Power Engineering Construction, MGSU, Moscow, Russian Federation

Vladimir G. Gagarin, Corresponding Member of RAACS, DSc in engineering, Professor, Chief Research Associate; Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Ismail G. Kantarzhi, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering, MGSU, Moscow, Russian Federation

Levon R. Mailyan, Academician of RAACS, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Highways, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Vladimir A. Orlov, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sewage, MGSU, Moscow, Russian Federation

Andrei P. Pustovgar, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Supervisor of the Research Institute of Building Materials and Technologies, MGSU, Moscow, Russian Federation

Alexey K. Solovyov, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Design of Buildings and Structures, MGSU, Moscow, Russian Federation

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Теличенко Валерий Иванович, председатель, академик РААСН, первый вице-президент РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, советник, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Акинтола Акинто, д-р, проф., декан Школы строительства и окружающей природной среды, проф. каф. экономики и управления строительством; член Центра по устойчивому развитию строительства, Университет Центрального Ланкашира, Престон, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

Беликов Виталий Васильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии речных бассейнов, Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

Белостоцкий Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, научный руководитель Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Ватин Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства уникальных зданий и сооружений, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Вернер Игорь М., д-р, Ph.D., Технион — Израильский институт технологий, Хайфа, Израиль

Власов Денис Николаевич, д-р техн. наук, начальник мастерской транспортного обслуживания Научно-проектного объединения транспорта и дорог, Научно-исследовательский и проектный институт Генерального плана города Москвы, Москва, Россия

Графкина Марина Владимировна, д-р техн. наук, проф., зав. каф. экологической безопасности технических систем, Московский политехнический университет, Москва, Россия

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., декан архитектурно-строительного факультета, зав. каф. строительных материалов и технологий, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Ильичев Вячеслав Александрович, академик РААСН, вице-президент РААСН, академик РИА, д-р техн. наук, проф., научный руководитель, ООО «Подземпроект», Москва, Россия

Ковлер Константин, д-р техн. наук, доц., Технион — Израильский институт технологий, Хайфа, Израиль

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. каф. уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Косицын Сергей Борисович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. теоретической механики, Российский университет транспорта, Москва, Россия

Куприянов Валерий Николаевич, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования зданий, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

Мешерин Виктор, доктор-инженер, проф., проф. каф. строительных материалов строительного института, Технический университет Дрездена, Германия

Орельская Ольга Владимировна, чл.-корр. РААСН, д-р арх., проф., проф. каф. архитектурного проектирования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

Первов Алексей Германович, д-р техн. наук, проф., проф. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Пономарев Андрей Будимирович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Сколубович Юрий Леонидович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., ректор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

Ткачев Валентин Никитович, д-р арх., проф., проф. каф. архитектуры, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Травуш Владимир Ильич, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., заместитель генерального директора по научной работе, главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Россия

Фардис Михаэль Н., д-р, проф., проф. и директор лаборатории конструкций строительного факультета, Университет Патраса, Патрас, Греция

Черный Роберт, д-р, проф., проф. каф. строительных материалов и химии, Чешский технический университет в Праге, Чешская Республика

EDITORIAL COUNCIL

Valery I. Telichenko, Chairman of Editorial Council, Academician of RAACS, First Vice-President of RAACS, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities, Advisor, MGSU, Moscow, Russian Federation

Akintola Akintoye, Dr. Eng., Professor, Dean of the School of Built and Natural Environment, Department of Construction Economics and Management; Member of the Center of Sustainable Development in Construction, University of Central Lancashire, Preston, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

Vilatiy V. Belikov, DSc in engineering, Chief Researcher of the Laboratory of Water Basin Hydrology, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Aleksandr M. Belostotskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotov, MGSU, Moscow, Russian Federation

Robert Cerny, Doctor, Professor, Department of Building Materials and Chemistry, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

Vladimir T. Erofeev, Academician of RAACS, DSc in engineering, Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, Head of the Department of Building Materials and Technologies, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

Michael N. Fardis, Doctor (Design of Buildings and Structures), Professor, Director of the Structures Laboratory of the Civil Engineering Faculty, University of Patras, Patras, Greece

Marina V. Grafkina, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Ecology and Safety of Engineering Systems, Moscow Polytechnic Institute, Moscow, Russian Federation

Vyacheslav A. Ilichev, Academician of RAACS, Vice-President of RAACS, Academician of Russian Engineering Academy, DSc in engineering, Professor, Scientific Director, LLC "Podzemproekt", Moscow, Russian Federation

Vitaliy I. Kolchunov, Academician of RAACS, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Unique Buildings and Structures, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

Sergey B. Kositsin, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

Konstantin Kovler, DSc, Associate Professor, Technion — Israel Institute of technology, Haifa, Israel

Valery N. Kupriyanov, Corresponding Member of RAACS, DSc in engineering, Professor, Department of Design of Buildings,

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Valery S. Lesovik, Corresponding Member of RAACS, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

Viktor Mescherin, Doctor-Engineer (Construction Materials), Professor, Department of Construction Materials of Construction Institute, Technical University of Dresden, Dresden, Germany

Olga V. Orelskaya, Corresponding Member of RAACS, Doctor of Architecture, Professor, Department of Architectural Design, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Alexey G. Pervov, DSc in engineering, Professor of the Department of Water Supply and Sewage, MGSU, Moscow, Russian Federation

Andrey B. Ponomarev, DSc in engineering, Professor, Head of the Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Yuri L. Skolubovich, Corresponding Member of RAACS, DSc in engineering, Professor, Rector, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

Valentin N. Tkachev, DSc Architecture, Professor, Department of Architecture, Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Travush, Academician of RAACS, DSc in engineering, Professor, Deputy Director General on Research Work, Chief Designer, "Gorproekt" CJSC, Moscow, Russian Federation

Nikolay I. Vatin, DSc in engineering, Professor, Professor of the Construction of Unique Buildings and Structures, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Igor' M. Verner, Ph.D. (Design Automation Systems (branch-wise)), Technion — Israel Institute of technology, Haifa, Israel

Denis N. Vlasov, DSc in engineering, Head of the Transport Service Workroom of Scientific and Design Association of Transport and Roads, Research and Project Institute of General Planning for the city of Moscow, Moscow, Russian Federation

Edmundas K. Zavadskas, International Member of RAACS, Dr. Sc. Engineering, Professor, Head of the Department of Construction Technologies and Management, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ	
М.П. Саинов, Н.С. Талалаев Влияние траектории разгрузки грунта на напряженно-деформированное состояние каменно-набросной плотины.....	6
С.М. Сельвиан, У.О. Москвкина, Е.А. Софронова, Д.Д. Антропова Мероприятия по минимизации осадок фундамента нового объекта строительства.....	26
И.М. Сутугина Информационное обеспечение мониторинга строительства с использованием современных технологий.....	42
А.З. Тер-Мартirosян, Л.Ю. Романенко, В.В. Рудь, П.В. Шишкина Влияние вторичной консолидации на длительные осадки оснований фундаментных плит большой площади.....	64
К.П. Зубарев, В.В. Казунин, В.Л. Добшиц, Л.Г. Гаранян, М.В. Емельянов, М.А. Слизова Исследования теплофизических параметров модульных фасадов.....	82
С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева Развитие системотехнических принципов управления при реализации реинжиниринга в строительстве.....	103
И.В. Мыльников, В.М. Туснина Исследование прочности и деформативности быстросборного контактного узла примыкания балки к колонне.....	125
В.С. Евстратов, А.П. Стрелков, Е.А. Гинзбург, Е.М. Железнов Интеграция результатов строительного контроля в информационную модель объекта капитального строительства для создания его цифрового двойника.....	144
АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ	
В.В. Шеин, М.Р. Древал Значимость художественно-эстетического аспекта оформления подземных пространств.....	156
А.Е. Коробейникова, А.А. Сокольников Влияние антропогенных факторов на изменение климата городов Арктической зоны Российской Федерации на примере Республики Коми.....	176
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
Б. Кандасубраманиан Интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения для экологичного строительства.....	204
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	
А.В. Корнева, М.Б. Белугина Деловая игра «Подготовка строительного производства» как дополнительный метод освоения дисциплины «Основы организации строительного производства» студентами строительного университета.....	233

CONTENT

BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS	
Mikhail P. Sainov, Nikita S. Talalaev Effect of the soil unloading path on the stress-strain state of a rockfill dam.....	6
Serafima M. Selviyan, Ulyana O. Moskovkina, Ekaterina A. Sofronova, Daria D. Antropova Measures to minimize foundation settlement in a new construction project.....	26
Irina M. Sutugina Information support for monitoring construction using modern technologies.....	42
Armen Z. Ter-Martirosyan, Lyubov Yu. Romanenko, Victoria V. Rud, Polina V. Shishkina Effect of secondary consolidation on long-term settlements of large-area raft foundations.....	64
Kirill P. Zubarev, Vyacheslav V. Kazunin, Victor L. Dobshits, Levon G. Garanyan, Mikhail V. Emelianov, Maria A. Slizova Studies of thermophysical parameters of modular facades.....	82
Sergey B. Sbarschikov, Natalia V. Lazareva Development of Systems Engineering Principles of Management in the Implementation of Re-engineering in the Construction Industry.....	103
Ivan V. Mylnikov, Valentina M. Tushina Investigation of the strength and deformability of a quick-assembly contact beam-to-column joint.....	125
Victor S. Evstratov, Alexey P. Strelkov, Evgeniya A. Ginzburg, Egor M. Zheleznov Integration of construction monitoring results into the information model of a capital construction project to create its digital twin.....	144
ARCHITECTURE. RECONSTRUCTION. RESTORATION. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT	
Valeriia V. Shein, Melani R. Dreval The significance of the artistic and aesthetic aspect in the design of underground spaces.....	156
Anna E. Korobeinikova, Alina A. Sokolnikova The influence of anthropogenic factors on climate change in the cities of the Russian Arctic, using the example of the Komi Republic.....	176
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS. TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIALS PRODUCTION. NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	
Balasubramanian Kandasubramanian Next-Generation Smart and Multifunctional Materials for Green Buildings.....	204
CONSTRUCTION INDUSTRY NEWS: REVIEWS OF EVENTS, CONFERENCES, EXHIBITIONS, BOOK NOVELTIES. BRIEF COMMUNICATIONS. DISCUSSIONS AND REVIEWS	
Angelina V. Korneva, Marianna B. Belugina Business game "Preparation of Construction Production" as a supplementary method for students at a construction university to master the subject "Fundamentals of the Organization of Construction Production".....	233

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.1

Влияние траектории разгрузки грунта на напряженно-деформированное состояние каменно-набросной плотины

Михаил Петрович Саинов¹, Никита Сергеевич Талалаев²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Деформирование грунтов имеет нелинейный, упругопластический характер. Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) высоких грунтовых плотин обязательно выполняют с применением нелинейных моделей механики грунтов (Мора – Кулона, упрочняющегося грунта и др.). Одним из важнейших проявлений нелинейности деформирования грунтов является различие характера деформаций для двух траекторий нагружения: при разгрузке обычно возникают только упругие деформации, а при активном нагружении — упругопластические. По мере нагружения область упругого деформирования увеличивается, этот эффект принято называть упрочнением. Однако не во всех нелинейных моделях, в частности в модели Мора – Кулона, учитывается этот эффект. Выполнены исследования по оценке степени влияния эффекта упрочнения на результаты численного моделирования НДС грунтовой плотины.

Материалы и методы. Расчеты проводились с помощью программного комплекса PLAXIS на примере однородной каменно-набросной плотины высотой 100 м. Использовалась линейная модель идеальной пластичности с условием прочности Кулона – Мора. Для выявления влияния эффекта сравнивались результаты расчета НДС для двух вариантов — с учетом наличия траектории разгрузки и без ее учета. Учет наличия области упругого деформирования осуществлялся с помощью поверхности пластичности.

Результаты. Исследование показало, что учет эффекта упрочнения кардинально изменяет результаты численного моделирования НДС грунтовой плотины. В процессе восприятия гидростатического давления часть грунта плотины испытывает не активное нагружение, а разгрузку. Учет этого эффекта упрочнения привел к уменьшению горизонтальных смещений плотины от гидростатического давления примерно в 2 раза. Кроме того, при учете эффекта упрочнения значительно повышается прогнозная оценка устойчивости плотины с диафрагмой — существенно снижается риск потери сдвиговой прочности и образования массива обрушения в ее верховой упорной призме.

Выводы. Применение для расчетов НДС грунтовых плотин моделей, не учитывающих эффект упрочнения грунта, например модели Мора – Кулона, недопустимо. Оно не только снижает запас несущей способности плотины, но сильно искажает результаты численного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каменно-набросная плотина, напряженно-деформированное состояние, разгрузка, упрочнение, модель Мора – Кулона, модель упрочняющегося грунта, устойчивость, поверхность пластичности, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саинов М.П., Талалаев Н.С. Влияние траектории разгрузки грунта на напряженно-деформированное состояние каменно-набросной плотины // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.1

Автор, ответственный за переписку: Михаил Петрович Саинов, SainovMP@mpei.ru.

Effect of the soil unloading path on the stress-strain state of a rockfill dam

Mikhail P. Sainov¹, Nikita S. Talalaev²

¹ National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Soil deformation exhibits a non-linear elastic-plastic behaviour. Consequently, modelling of the stress-strain state (SSS) of high embankment dams is necessarily carried out using non-linear rock mechanics models (Mohr – Coulomb, soil hardening and others). One of the key manifestations of the non-linearity of soil deformation is the different nature of deformations under two loading scenarios: during unloading, typically only elastic deformations occur, whereas during active loading, elastic-plastic deformations take place. During loading, the area of elastic deformation increases; this effect is commonly referred to as hardening. However, not all non-linear models, specifically the Mohr – Coulomb model, take this effect into account. This paper presents studies on estimating the extent to which the hardening effect influences the results of numerical modelling of the SSS of embankment dams.

Materials and methods. The analysis was carried out using the PLAXIS software package, using a homogeneous 100-high rockfill dam as an example. A linear model of ideal plasticity with the Mohr – Coulomb strength state condition was employed. To determine the extent of the effect, the results of SSS analysis were compared for two scenarios: one taking into account the existing unloading trajectory and one without it. The existing area of elastic deformation was accounted for using a plasticity surface.

Results. The investigation showed that taking the hardening effect into account radically alters the results of SSS numerical modelling of the rockfill dam. When subjected to hydrostatic pressure, part of the dam soil is not under active loading but is instead unloaded. Taking this hardening effect into account led to an approximately twofold reduction in the horizontal displacements of the dam caused by hydrostatic pressure. Furthermore, when the hardening effect is taken into account, the predicted stability of the dam with a diaphragm increases significantly; the risk of loss of shear strength and the formation of a collapse mass in its upstream face decreases considerably.

Conclusions. The use of models that do not account for the soil hardening, such as the Mohr – Coulomb model, in SSS analyses of embankment dams is not permitted. Such models not only underestimate the dam's load-bearing capacity margin but also significantly distort the numerical simulation results.

KEYWORDS: rockfill dam, stress-strain state, unloading, hardening, Mohr – Coulomb model, Hardening Soil Model, stability, yield surface, numerical simulation

FOR CITATION: Sainov M.P., Talalaev N.S. Effect of the soil unloading path on the stress-strain state of a rockfill dam. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.1

Corresponding author: Mikhail P. Sainov, SainovMP@mpei.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Предмет исследования. Напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтовых плотин имеет сложный характер, и это, прежде всего, связано со сложным характером деформирования грунтов под нагрузкой. Грунты не являются упругим материалом, при нагружении грунта происходят не только обратимые упругие, но и необратимые пластические деформации. По этой причине связь между напряжениями и деформациями в грунте не может быть описана теорией упругости и линейной моделью, основанной на законе Гука. При деформировании грунта проявляются различные нелинейные эффекты (явления) — упрочнение, дилатансия, ползучесть и др. Одним из важнейших нелинейных эффектов служит различие характера деформирования при двух траекториях нагружения — активном нагружении и при разгрузке. При разгрузке в грунте в основном проявляются только упругие деформации и грунт имеет большую жесткость, чем при активном нагружении. По мере роста сжимающих напряжений область напряженного состояния, соответствующая упругому деформированию, увеличивается, этот эффект называется эффектом упрочнения.

Актуальность исследования. Особенно сильно пластические свойства грунта проявляются в крупных грунтовых сооружениях, испытывающих большие нагрузки, к таким сооружениям относят грунтовые плотины. В процессе восприятия нагрузок грунтовые плотины получают большие деформации и перемещения. Строительные осадки высоких

каменно-набросных плотин [1–3] могут достигать несколько метров. В процессе деформирования плотины могут быть потеряны сдвиговая прочность грунта и устойчивость сооружения. Например, в статье [4] с помощью численного моделирования показано, что сверхвысокая каменно-набросная плотина с диафрагмой может потерять свою устойчивость по двум схемам: с обрушением низового откоса по криволинейной поверхности и с образованием призмы обрушения в верховой упорной призме. Отмечается, что незатухающий характер осадок и смещений каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС вызывает опасения в устойчивости ее низового откоса [5].

Указанные примеры наглядно демонстрируют, что прогноз НДС и устойчивости грунтовой плотины должен осуществляться только с применением нелинейной модели механики грунтов. Такое требование для плотин I и II классов установлено и в нормативном документе СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов».

Однако общепринятой и всеобъемлющей модели грунта пока не существует, для моделирования грунтовых плотин используют несколько математических моделей механики грунтов. Актуален вопрос о совершенствовании известных или разработке новых моделей грунта.

Особую важность имеет оценка точности расчетных прогнозов НДС грунтовых плотин, получаемых с помощью этих моделей. Необходимо оценить, насколько применяемая модель адекватно воспроизводит поведение грунта и как принятые в моделях

грунта допущения влияют на качество численного моделирования.

Обзор литературы. Обзор научных публикаций показывает, что в настоящее время при численном моделировании НДС грунтовых сооружений применяются несколько моделей грунта [6].

Используют математические модели двух типов — модели нелинейной упругости (деформационной теории пластичности) и модели теории пластического течения.

Самая простая нелинейная модель — модель Мора – Кулона (Mohr – Coulomb model, далее — MCM). Эта модель относится к моделям деформационной теории пластичности. В ней принимается, что до момента потери сдвиговой прочности связь между деформациями и напряжениями — линейная, а после достижения сдвиговой прочности деформации увеличиваются бесконтрольно. Соответственно, MCM — это линейная модель идеальной пластичности. Во многих других моделях используется условие сдвиговой прочности Кулона – Мора. Большой недостаток MCM заключается в том, что она не учитывает эффект «упрочнения» — снижение деформируемости грунта по мере уплотнения.

Более совершенной является гиперболическая модель Duncan – Chang, которая основана на гиперболической зависимости между напряжениями и деформациями в грунтах. Модель разработана J.M. Duncan и C.Y. Chang в 1970 г. Эта модель относится к моделям нелинейной упругости. В ней деформативные характеристики грунта (модуль линейной деформации E , модуль объемной деформации B) принимаются переменными в зависимости от напряженного состояния, благодаря чему модель учитывает эффект «упрочнения» грунта. Однако модель Duncan – Chang не отражает происходящие в грунте механические процессы, а лишь аппроксимирует их.

Важный недостаток гиперболической модели в том, что она не разграничивает в явном виде траектории активного нагружения и разгрузки. Этого недостатка лишены модели пластического течения. Они основаны на ассоциированном законе течения, в них принимается, что направление вектора пластических деформаций ортогонально к поверхности пластичности (текучести).

Поверхность пластичности разграничивает в напряженном состоянии области упругого и упругопластического деформирования, которые соответствуют траекториям разгрузки и активного нагружения. Графически поверхность пластичности отображают в пространстве главных напряжений или пространстве инвариантов тензора напряжений (рис. 1). Величина p представляет собой среднее напряжение, которое с точностью до множителя соответствует первому инварианту тензора напряжений. Величину q называют «девиаторным напряжением», оно с точностью до множителя соответствует второму инварианту девиатора напряжений и интенсивности касательных

напряжений применительно к плоской задаче. Величину q определяют как разницу максимального и минимального главного напряжения, она в 2 раза больше максимальных касательных напряжений.

К моделям пластического течения относятся модели Cam-Clay и модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil model, далее — HSM). В них используется поверхность пластичности шатровой формы.

Модель Cam-Clay применяется для мелкозернистых грунтов. HSM может использоваться и для крупнообломочных грунтов, так как она учитывает еще один эффект упрочнения — эффект снижения деформируемости грунта с увеличением сжатия. В HSM модуль деформации не является константой, его величина изменяется по степенной функции от напряжения бокового обжатия [6].

Разными исследователями применяются разные модели. При моделировании небольших сооружений обычно используют MCM. В Китае наибольшее распространение получила гиперболическая модель Duncan – Chang, примерами таких исследований являются публикации [7, 8]. Модель Cam-Clay использована в исследовании [9] для описания поведения глинистого грунта в теле каменно-земляной плотины. HSM применяется реже, чем MCM и гиперболическая модель.

Вопросу о выборе моделей и их параметров по-прежнему уделяется большое внимание. Публикуются статьи, посвященные калибровке моделей и подбору их параметров, адекватно воспроизводящих поведение грунта при лабораторных испытаниях [10–12] или поведение построенной плотины [13].

В статье М. Ху и соавт. [14] экспериментами в крупномасштабном стабилометре показано, что деформации каменной наброской существенно зависят от траектории нагружения.

Имеются исследования, в которых приведено сравнение результатов численного моделирования НДС грунтовой плотины с использованием разных моделей.

Выполнено сравнение MCM и HSM [15–17]. Проведено сравнение MCM и HSM применительно к анализу НДС каменно-земляной плотины Karkheh (Иран) [17]. Сравнение MCM и HSM осуществлено для каменно-

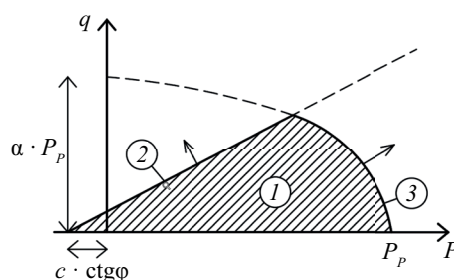


Рис. 1. Схема положения поверхности пластичности: 1 — область упругого деформирования; 2 — поверхность текучести при сдвиге; 3 — поверхность текучести при сжатии

земляной плотины с глиняным ядром высотой 59 м [15]. Показано, что учет в HSM эффекта упрочнения грунта ведет к уменьшению расчетных осадок плотины примерно на 50 %. В исследовании [18] продемонстрировано, что МСМ менее точно воспроизводит реальное поведение плотины, чем упругопластическая модель, основанная на других принципах.

В работе [19] представлено сравнение гиперболической модели и HSM на примере каменно-набросной плотины с железобетонным экраном высотой 182 м.

Кроме того, разрабатываются и применяются новые модели грунта. Статьи [12, 20, 21] посвящены разработке новых моделей грунта.

Цели и задачи исследования. Цель исследования состоит в оценке влияния эффекта разгрузки грунта на формирование НДС высокой грунтовой плотины. Это позволит оценить точность моделирования НДС плотины при использовании МСМ, которая не учитывает указанный эффект.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика исследования заключается в сравнении результатов расчетов НДС грунтовой плотины для двух вариантов — без учета эффекта разгрузки грунта и с его учетом.

Объект исследования. Исследование выполнялось на примере каменно-набросной плотины высотой 100 м, расположенной на жестком основании. Плотина имеет симметричный профиль, ширина гребня — 10 м, заложение откосов — 2. Расчет проводился на два вида нагрузок — собственный вес и гидростатическое давление со стороны водохранилища. В исследовании рассматривались плотины двух типов.

Плотина первого типа — плотина с тонким негрунтовым экраном, расположенным на верхнем откосе. Для плотины этого типа характерно то, что гидростатическое давление приложено на водонепроницаемый верховой откос и потому не только стремится сдвинуть плотину в сторону нижнего бьефа, но и прижимает тело плотины.

Плотина второго типа — плотина с тонкой вертикальной диафрагмой. Особенность условий работы заключается в том, что водонепроницаемая напорная грань расположена внутри тела плотины, а гидростатическое давление приложено горизонтально. При этом оно вызывает дополнительное сжатие низовой упорной призмы плотины и уменьшает сжатие в верховой упорной призме. Кроме того, при наполнении водохранилища происходит переход грунта во взвешенное состояние.

В обоих случаях жесткость противофильтрационного элемента (экрана, диафрагмы) плотины не учитывалась, плотина принималась однородной, состоящей только из каменной наброски.

Плотность каменной наброски принималась: в сухом состоянии — $2,0 \text{ т/м}^3$, в водонасыщенном состоянии — $2,32 \text{ т/м}^3$.

Методика исследования. Расчеты выполнялись с помощью вычислительного программного комплекса PLAXIS. Тело плотины было разделено на 1812 треугольных конечных элементов с 14 829 узлами. Расчет осуществлялся с учетом последовательности возведения и нагружения сооружения. Принималось, что сначала плотина будет отсыпана до гребня горизонтальными слоями (25 слоев), а затем будет постепенно наполняться водохранилище до глубины 96 м. Общее количество расчетных этапов составило 49.

Программный комплекс MIDAS позволяет проводить расчет НДС с применением нескольких моделей грунта, в том числе МСМ, HSM.

Для того чтобы выявить влияние на НДС плотины только одного фактора, эффекта разгрузки, было принято решение использовать линейную модель идеальной пластичности. Понятие линейной модели означает пропорциональность между деформациями и напряжениями. Модуль линейной деформации каменной наброски принят равным $E = 58 \text{ МПа}$, а коэффициент Пуассона — $\nu = 0,27$. В качестве критерия идеальной пластичности принимался критерий Кулона — Мора. Угол внутреннего трения принят $\varphi = 43^\circ$, удельное сцепление — $c = 50 \text{ кПа}$. Наличие у сыпучего крупнообломочного грунта высокого сцепления призвано смоделировать эффект зацепления между частицами. В труде [10] путем обработки результатов экспериментов, описанных в работах [22, 23], показано, что реальная каменная наброска имеет еще большее сцепление.

Расчет выполнялся для двух расчетных моделей: Модель № 1 — модель без эффекта разгрузки, она соответствует модели Мора — Кулона.

Модель № 2 — модель с разделением траекторий на активное нагружение и разгрузку.

Модель № 2 получена посредством упрощения модели упрочняющегося грунта. Для приведения HSM к линейной модели секущий модуль линейной деформации принят равным $E_{50} = E = 58 \text{ МПа}$, показатель степени $m = 0$. Одометрический модуль вычислен через E и коэффициент Пуассона ν , он составил $E_{oed} = 72,47 \text{ МПа}$.

Для ветви разгрузки секущий модуль линейной деформации был принят равным $E_{ur} = 116 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_{ur} = \nu = 0,27$.

Отдельно определялось значение параметра (коэффициент бокового давления) K_{0nc} модели HSM, который характеризует форму поверхности пластичности. Обычно его рекомендуют принимать $K_{0nc} = 1 - \sin\varphi$, в этом случае его значение составляет 0,318. Авторы настоящего исследования определяли это значение подбором так, чтобы деформации плотины по моделям № 1 и 2 совпали на этапе возведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Напряженно-деформированное состояние плотины от собственного веса

Добиться полной идентичности НДС плотины для моделей № 1 и 2 невозможно, поэтому было по-

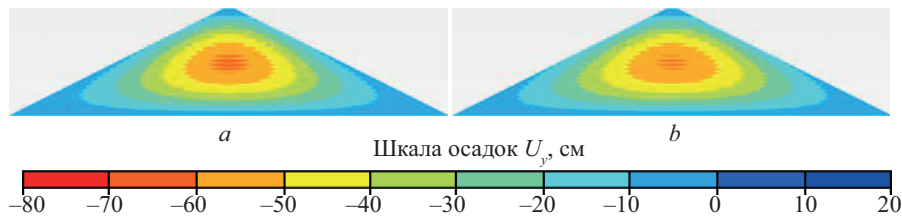


Рис. 2. Осадки плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

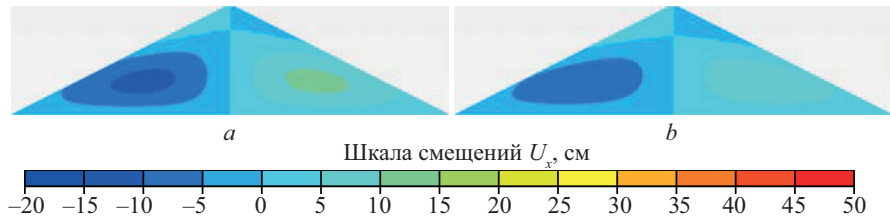


Рис. 3. Горизонтальные смещения плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

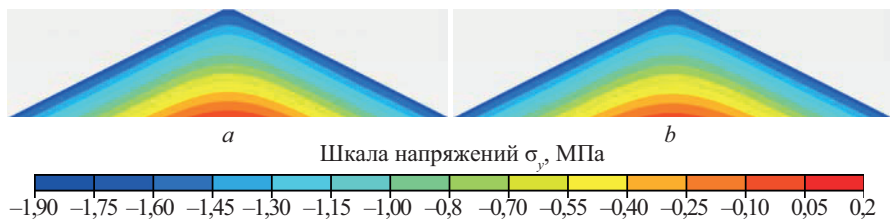


Рис. 4. Вертикальные напряжения в теле плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

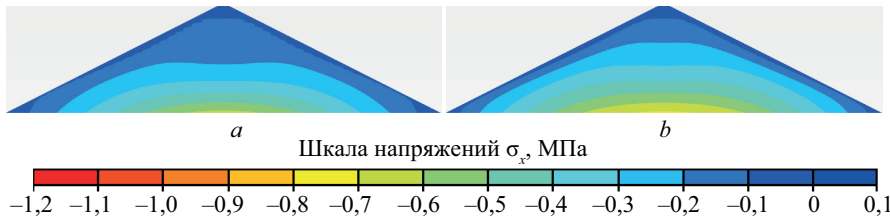


Рис. 5. Горизонтальные напряжения в теле плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

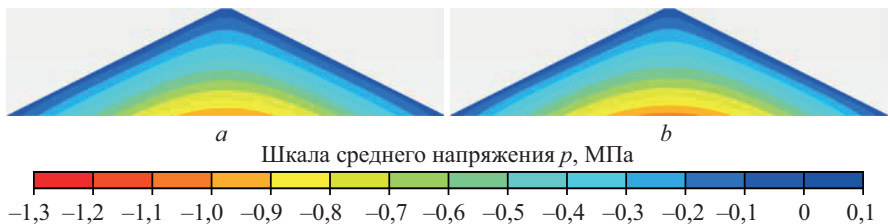


Рис. 6. Среднее напряжение в теле плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

добрено такое значение параметра K_{0nc} , при котором отличия будут наименьшим. Оно составило $K_{0nc} = 0,43$.

Полученное расчетом напряженно-деформированное состояние плотины от собственного веса показано на рис. 2–7 в сравнении моделей № 1 и 2. Качественная картина НДС одинакова, различие заключается лишь в величинах.

Так как моделирование осуществлялось с учетом последовательности возведения плотины, максимум строительных осадок достигается в центральной ча-

сти плотины. Максимальная строительная осадка плотины составила: в модели № 1 — 63,0 см (рис. 2, *a*), в модели № 2 — 66,0 см (рис. 2, *b*), различие составляет менее 5 %. Осадки плотины под собственным весом сопровождаются расширением плотины в стороны. Максимальное горизонтальное смещение составило: в модели № 1 — 11,4 см (рис. 3, *a*), модели № 2 — 10,1 см (рис. 3, *b*), различие составляет около 10 %.

Нормальные напряжения в теле плотины увеличиваются по глубине и достигают максимума у подо-

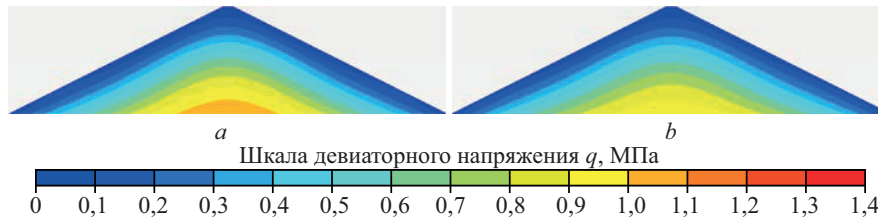


Рис. 7. Девиаторное напряжение в теле плотины под действием собственного веса: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

швы средней части упорной призмы. Максимальное по величине вертикальное напряжение σ_y в обеих моделях составило около 1,7 МПа (рис. 4). Для распределения горизонтальных напряжений σ_x характерно образование зоны повышенного сжатия у подошвы. Максимальное по величине горизонтальное напряжение σ_x составило: 0,67 МПа в модели № 1 (рис. 5, *a*) и 0,77 МПа в модели № 2 (рис. 5, *b*), отличие — 14 %.

Поскольку в модели пластического течения положение поверхности пластичности отражается в пространстве инвариантов тензора напряжений, были проанализированы значения величин p и q . Характер их распределения похож на характер распределения напряжений σ_y , они постепенно увеличиваются по глубине, достигая максимума у подошвы по оси плотины. Максимальное значение среднего напряжения p составило: в модели № 1 — 1,00 МПа (рис. 6, *a*), в модели № 2 — 1,04 МПа (рис. 6, *b*). Максимальное значение девиаторного напряжения q : в модели № 1 — 1,09 МПа (рис. 7, *a*), в модели № 2 — 1,09 МПа (рис. 7, *b*). При таком соотношении q/p сдвиговая прочность грунта обеспечена с запасом.

Напряженно-деформированное состояние плотины с экраном

НДС плотины после приложения гидростатического давления на верховую грань (экран) показано на рис. 8–13. Добавление нагрузки в основном сказывается только в верховой части плотины. Степень этих изменений различается в моделях № 1 и 2.

Для плотины с экраном в модели № 1 осадка верховой грани возросла с 13 см (без гидростатического давления) до 36,6 см (рис. 8, *a*), а в модели № 2 — до 37,4 см (рис. 8, *b*). Максимальная осадка плотины остается практически неизменной.

Приложение гидростатического давления привело к значительному росту смещений плотины в сторону нижнего бьефа. На момент окончания наполнения максимальное смещение верховой грани (экрана) составило: в модели № 1 (МСМ) — 21,4 см (рис. 9, *a*), в модели № 2 — всего 10,0 см (рис. 9, *b*). Подсчитаем приращения смещений от гидростатического давления в точках, где они достигли своего максимума. В модели № 1 (МСМ) смещения экрана составили: до наполнения — минус 3,2 см (рис. 3, *a*), после наполнения — 21,4 см, соответственно прирост смещения — 24,6 см. В модели № 2 (МСМ) смещения экрана составили: до наполнения — минус 6,6 см (рис. 3, *b*), после наполнения — 10,1 см, соответственно прирост смещения составил 16,7 см. Таким образом, учет эффекта разгрузки привел к снижению сдвиговых смещений плотины на треть.

Этот значительный эффект разгрузки объясняется особенностью формирования напряженного состояния после наполнения водохранилища. При приложении гидростатического давления в верховой части тела плотины происходит рост сжимающих напряжений σ_y (рис. 10) и σ_x (рис. 11), а в низовой части плотины они практически не изменяются. Соответ-

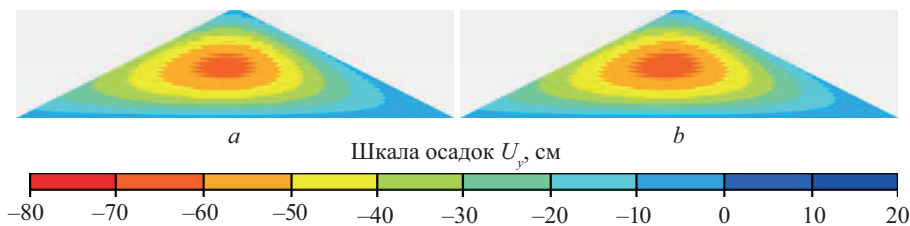


Рис. 8. Осадки плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

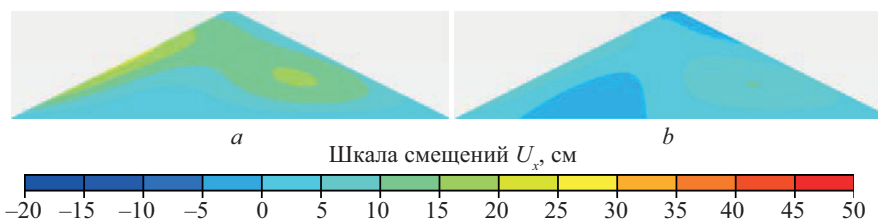


Рис. 9. Горизонтальные смещения плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

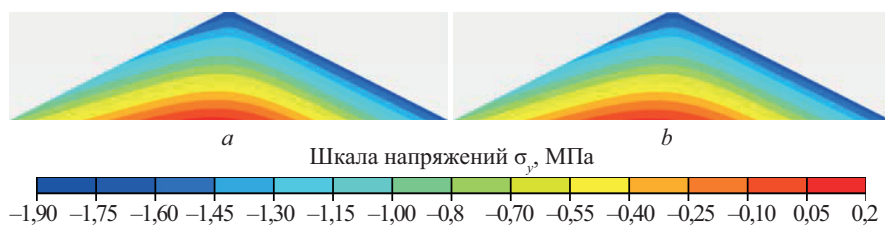


Рис. 10. Вертикальные напряжения в теле плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

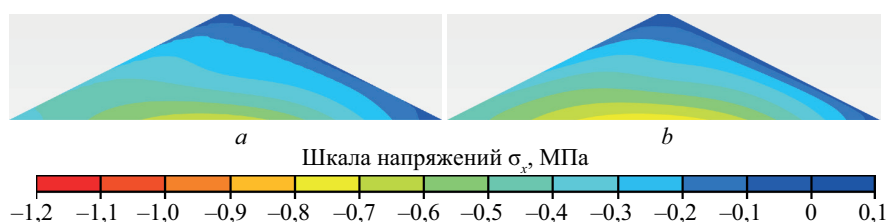


Рис. 11. Горизонтальные напряжения в теле плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

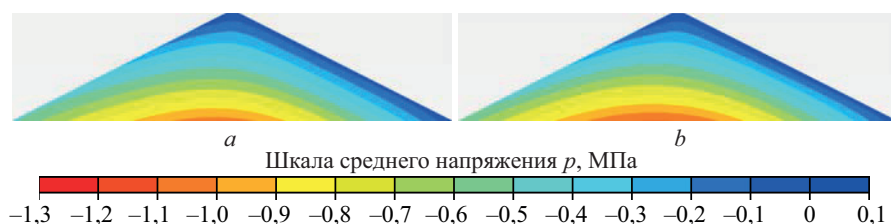


Рис. 12. Среднее напряжение в теле плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

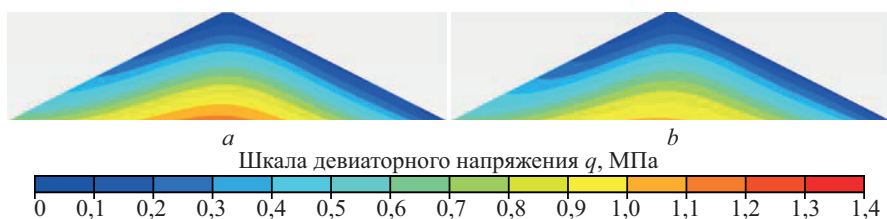


Рис. 13. Девиаторное напряжение в теле плотины с экраном после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

ственно, увеличение среднего напряжения p (рис. 12) и девиаторного напряжения q (рис. 13) происходит лишь в верховой части плотины, в низовой части — они сохраняются постоянными. Соответственно, активное нагружение испытывает грунт только в верховой части плотины, а в низовой части восприятие дополнительной нагрузки сопровождается только упругими деформациями (траектория разгрузки).

Напряженно-деформированное состояние плотины с диафрагмой

НДС плотины после приложения гидростатического давления на центральную диафрагму показано

на рис. 14–19. Из рис. 14–19 видно, что добавление горизонтальной нагрузки на диафрагму вызывает значительные изменения НДС плотины.

Особенно сильные изменения НДС характерны для модели № 1 — происходит значительный рост горизонтальных смещений плотины. В модели № 1 (МСМ) максимальное горизонтальное смещение — 48,9 см (рис. 14, *a*), что составляет 78 % от максимальной строительной осадки. Максимум смещений приходится примерно посередине высоты плотины. Смещения сопровождаются образованием в верховой упорной призме плотины наклонных поверх-

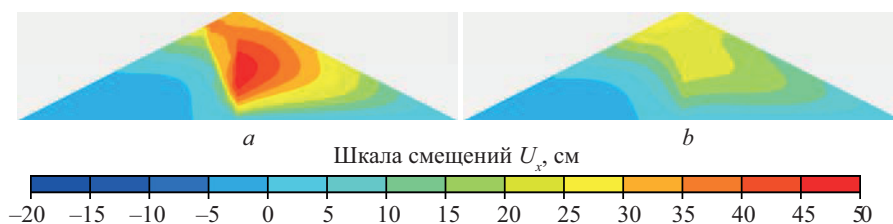


Рис. 14. Смещения плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

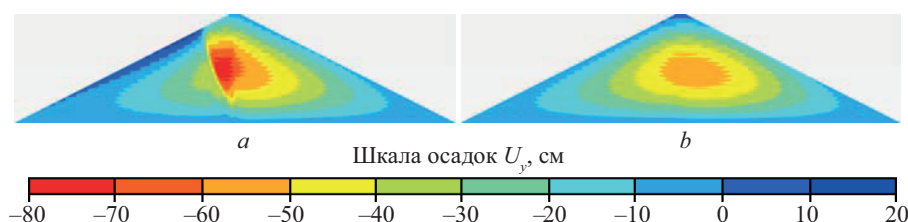


Рис. 15. Осадки плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

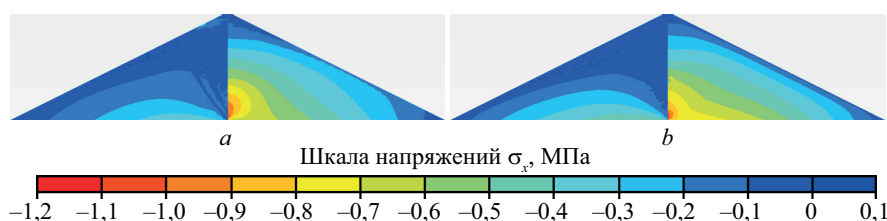


Рис. 16. Горизонтальные напряжения в теле плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

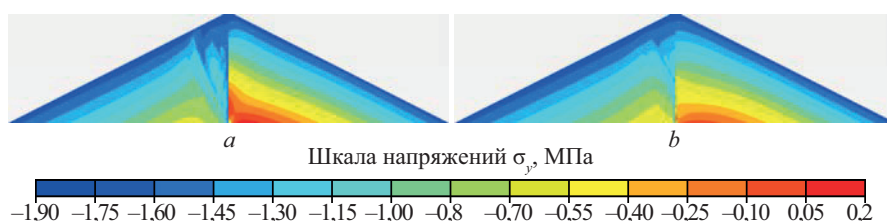


Рис. 17. Вертикальные напряжения в теле плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

ностей скольжения и призм обрушения (рис. 15, *a*). Максимальная осадка призмы обрушения — 76,8 см.

Эти деформации сопровождаются ростом сжимающих горизонтальных напряжений σ_x в низовой упорной призме и их резким падением в верховой призме (рис. 16, *a*). Вертикальные напряжения σ_y в низовой части изменяются мало, заметные изменения характерны лишь в центральной области плотины, прилегающей к диафрагме (рис. 17, *a*). В верховой упорной призме происходит уменьшение σ_y за счет взвешивающего действия воды на грунт. А в призме обрушения наблюдается резкое снижение сжимающих напряжений.

Образование в плотине с диафрагмой призмы обрушения подтверждается результатом исследования В.В. Орехова [4].

Однако в модели № 2 приложение гидростатического давления не приводит к столь опасным изменениям НДС. Максимальное смещение составило лишь 27,3 см (рис. 14, *b*), т.е. примерно вдвое меньше, чем в модели № 1. Максимум смещений наблюдается на гребне плотины.

При таких смещениях в плотине не происходит образование призмы обрушения в верховой части плотины. В модели № 2 хорошо заметно уменьшение осадок в плотине, которое по большей части вызвано пере-

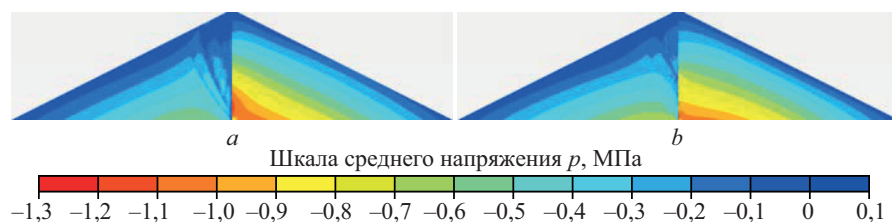


Рис. 18. Среднее напряжение в теле плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

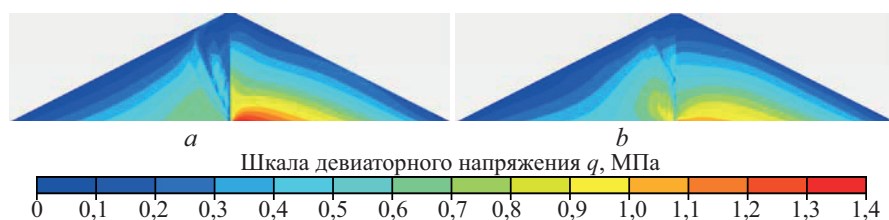


Рис. 19. Девиаторное напряжение в теле плотины с диафрагмой после наполнения водохранилища: *a* — модель № 1; *b* — модель № 2

ходом грунта верховой упорной призмы во взвешенное состояние. Максимальная осадка составила 58,5 см (рис. 15, *b*), т.е. на 7,5 см, чем от собственного веса.

Значительное уменьшение смещений в модели № 2 по сравнению с моделью № 1 наглядно демонстрирует влияние эффекта разгрузки на НДС плотины с диафрагмой. Для определения вида траекторий нагружения (активное нагружение или разгрузка) грунта плотины проанализируем напряженное состояние плотины. Сравнивая до и после наполнения водохранилища средние напряжения p (рис. 6 и рис. 18), девиаторные напряжения (рис. 7 и рис. 19) можно заметить, что для разных зон плотины характерны разные траектории нагружения. В верховой упорной призме происходит одновременное снижение среднего напряжения p и девиаторного напряжения, соответственно, в этой зоне грунт может испытывать как активное нагружение, так и разгрузку. В большей части низовой упорной призмы отмечается увеличение среднего напряжения при одновременном снижении девиаторного напряжения q , следовательно, грунт испытывает разгрузку. Соответственно, в модели № 2 гораздо меньший объем плотины испытывает пластические деформации, что и объясняет уменьшение горизонтальных смещений плотины.

Кроме того, выполнен расчет НДС плотины с диафрагмой для варианта с меньшим значением сцепления каменной наброски — 15 кПа. В этом случае по модели № 1 (МСМ) плотина исчерпала свою несущую способность и решение получено не было. При расчете по модели № 2 горизонтальные смещения плотины практически не увеличились, но в верховой призме произошло образование поверхности скольжения и формирование призмы обрушения. Это наглядно

показывает значительное влияние эффекта разгрузки на НДС каменно-набросной плотины с диафрагмой.

Однако необходимо отметить, что полученные результаты относятся к выбранному способу учета эффекта упрочнения грунта с помощью использования в модели грунта пластического течения, которая основана на ассоциированном законе течения. Тем не менее ассоциированный закон течения часто не подтверждается экспериментально. Учитывая, что эффект упрочнения оказывает значительное влияние на результаты моделирования НДС, вопрос о способе учета траекторий нагружения требует отдельной проработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе формирования напряженно-деформированного состояния плотины грунт может испытывать разные траектории нагружения. При восприятии нагрузки от гидростатического давления одна часть тела плотины может испытывать активное нагружение с упругопластическими деформациями, а другая — разгрузку с упругими деформациями. Особенно это характерно для плотины с внутренней диафрагмой, в плотине этого типа грунт верховой и низовой упорной призм имеет разные траектории нагружения.

Учет того факта, что часть плотины при восприятии нагрузки не испытывает пластических деформаций, ведет к значительному изменению результатов численного моделирования НДС.

Изменение результатов расчета НДС, прежде всего, выражается в существенном уменьшении горизонтальных смещений плотины от гидростатического давления. В рассмотренном примере максимальное горизонтальное смещение плотины с водонепроница-

мым экраном и плотины с центральной диафрагмой уменьшилось примерно в 2 раза.

Учет эффекта упрочнения грунта при расчете НДС плотины с диафрагмой ведет к существенному увеличению запаса несущей способности плотины. За счет уменьшения горизонтальных смещений значительно снижается риск потери сдвиговой прочно-

сти грунта верховой упорной призмы и формирования в ней призмы обрушения.

Применение для расчетов НДС грунтовых плотин моделей, которые не учитывают эффект упрочнения грунта, например модели Мора – Кулона, недопустимо. Оно сильно искажает результаты численного моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories // *Géotechnique*. 2018. Vol. 68. Issue 9. Pp. 749–771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095
2. Park H.G., Kim Y.-S., Seo M.-W., Lim H.-D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2005. Vol. 21. Issue 7. Pp. 91–105.
3. Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 207–224. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.207-224. EDN YXZHQD.
4. Орехов В.В. Устойчивость грунтовой плотины с вертикальной диафрагмой // *Вестник МГСУ*. 2016. № 1. С. 143–149. EDN VJIGEB.
5. Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Юрьев С.В., Лисицкий С.Е., Баклыков И.В. Анализ результатов натурных и расчетных исследований прочности и устойчивости каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС с прогнозированием ее состояния // *Природообустройство*. 2024. № 2. С. 48–56. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-2-48-56. EDN ZEAJWK.
6. Кургузов К.В., Фоменко И.К. Основополагающие математические модели грунтов в практике геотехнического моделирования : обзор // *Естественные и технические науки*. 2019. № 5 (131). С. 240–247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04. EDN KGJTQF.
7. Gao Ju., Han X., Han W., Dang F., Ren J., Xue H. et al. Research on the slip deformation characteristics and improvement measures of concrete-faced rockfill dams on dam foundations with large dip angles // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Issue 1. P. 8665. DOI: 10.1038/s41598-024-59222-0. EDN MPULSO.
8. Chen H., Liu D. Numerical simulations of multiple cracks in concrete face rockfill dams coupled multi-factor during construction // *Case Studies in Construction Materials*. 2025. Vol. 22. P. e04609. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04609. EDN EZGBDK.
9. Liu S., He W., Sun Yi., Shen Ch., Wang L. Analysis of the behavior of a high earth-core rockfill dam considering particle breakage // *Computers and Geotechnics*. 2023. Vol. 157. P. 105320. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105320. EDN AKTNOQ.
10. Саинов М.П., Котов Ф.В. Параметры модели упрочняющегося грунта для моделирования высоких грунтовых плотин // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2024. Т. 10. № 2. С. 56–67. EDN FJGMOI.
11. Sukkarak R., Jongpradist P., Pramthawee P. A modified valley shape factor for the estimation of rockfill dam settlement // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 108. Pp. 244–256. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.001
12. Liu S., Sun Y., Shen C., Yin Z. Practical nonlinear constitutive model for rockfill materials with application to rockfill dam // *Computers and Geotechnics*. 2020. Vol. 119. P. 103383. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103383
13. Vahdati P., Levasseur S., Mattsson H., Knutsson S. Inverse Hardening Soil Parameter Identification of an Earth and Rockfill Dam by Genetic Algorithm Optimization // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014. Vol. 19. Pp. 3327–3349.
14. Xu M., Song E., Chen J. A large triaxial investigation of the stress-path-dependent behavior of compacted rockfill // *Acta Geotechnica*. 2012. Vol. 7. Pp. 167–175. DOI: 10.1007/s11440-012-0160-0. EDN DWAMYP.
15. Bhutto A.H., Zardari S., Zardari M.A., Bhurgri G.S., Memon B.A., Bhanbhro R. et al. Mohr-Coulomb and Hardening Soil Model Comparison of the Settlement of an Embankment Dam // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019. Vol. 9. Issue 5. Pp. 4654–4658. DOI: 10.48084/etasr.3034
16. Котов Ф.В., Саинов М.П. Параметры нелинейных моделей грунта для расчета напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 3. С. 28–56. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.28-56. EDN WARIUO.
17. Samadi-Boroujeni H., Haghshenas-Adarnabadi A., Shayannejad M., Khabbaz H. Comparison of Mohr-Coulomb and hardening soil constitutive models for simulation of settlements in the Karkheh earth dam // *Australian Geomechanics Journal*. 2023. Vol. 58. Issue 3. Pp. 143–158. DOI: 10.56295/AGJ5836. EDN CZDECJ.
18. Dong W., Hu L., Yu Y.Z., Lv H. Comparison between Duncan and Chang's EB Model and the Generalized Plasticity Model in the Analysis of a High Earth-

Rockfill Dam // Journal of Applied Mathematics. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2013/709430

19. *Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W.* Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams // Songklanakarin Journal of Science and Technology. 2011. Vol. 33. Issue 3.

20. *Sukkarak R., Pramthawee P., Jongpradist P.* A modified elasto-plastic model with double yield surfaces and considering particle breakage for the settlement analysis of high rockfill dams // KSCE Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 21. Issue 3. Pp. 734–745. DOI: 10.1007/s12205-016-0867-9. EDN KOOEXH.

21. *Jongpradist P.* Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects // Geomechanics and Engineering. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 211–224. DOI: 10.12989/gae.2018.14.3.211

22. *Marsal R.J.* Large Scale Testing of Rockfill Materials // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1967. Vol. 93. Issue 2. Pp. 27–43. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000958

23. *Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y.* Research on the Particle Breakage of Rockfill Materials during Triaxial Tests // International Journal of Geomechanics. 2017. Vol. 17. Issue 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000977

Поступила в редакцию 17 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 19 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 14 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Петрович Саинов** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетических и гидротехнических сооружений; **Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; SPIN-код: 2369-9626, Scopus: 6506150284, ORCID: 0000-0003-1139-3164; SainovMP@mpei.ru;

Никита Сергеевич Талалаев — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1227780, Scopus: 59319522100, ResearcherID: PNG-6395-2026, ORCID: 0009-0001-9424-9661; talalaevnicta@yandex.ru.

Вклад авторов:

Саинов М.П. — научное руководство, идея исследования, сбор материала, развитие методологии, написание исходного текста, оформление статьи, научное редактирование текста.

Талалаев Н.С. — сбор и обработка материала, выполнение расчетов, развитие методологии, обработка и оформление текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Subject of the study. The stress-strain state of earth dams is complex in nature, primarily due to the complex nature of soil deformation under load. Soils are not elastic materials; when loaded, they undergo not only reversible elastic deformations but also irreversible plastic deformations. For this reason, the relationship between stresses and strains in soil cannot be described by elasticity theory or a linear model based on Hooke's law. Various non-linear effects (phenomena) manifest themselves during soil deformation — consolidation, dilatation, creep, etc. One of the most significant non-linear effects is the difference in the nature of deformation under two loading trajectories — active loading and unloading. During unloading, the soil mainly exhibits only elastic deformations and has greater stiffness than during active loading. As compressive stresses increase, the stress state corresponding to elastic deformation expands; this effect is known as the consolidation effect.

Significance of the study. The plastic properties of soil are particularly evident in large earthworks subjected to heavy loads; earth dams are among such structures.

When subjected to loads, earth dams undergo significant deformations and displacements. Construction settlements in high rockfill dams [1–3] can reach several metres. During the deformation of the dam, the soil's shear strength and the stability of the structure may be lost. For example, in [4], numerical modelling demonstrates that an ultra-high rockfill dam with a diaphragm may lose its stability in two ways: through the collapse of the toe slope along a curved surface, and through the formation of a collapse prism within the upstream abutment prism. It is noted that the non-damping nature of the settlements and displacements of the rockfill dam at the Boguchanskaya Hydroelectric Power Station raises concerns regarding the stability of its downstream slope [5].

The above examples clearly demonstrate that the stress-strain state and stability of an earth dam should be predicted only using a nonlinear soil mechanics model. This requirement for Class I and II dams is also set out in the regulatory document SP 39.13330.2012 “Dams Constructed of Earth Materials”.

However, there is as yet no universally accepted and comprehensive soil model; several mathematical

soil mechanics models are used to simulate earth dams. The issue of refining existing soil models or developing new ones remains a pressing one.

It is particularly important to assess the accuracy of the calculated predictions of the design strength of earth dams obtained using these models. It is necessary to assess the extent to which the model used adequately reproduces soil behaviour and how the assumptions made in the soil models affect the quality of the numerical simulation.

Literature review. A review of scientific publications shows that several soil models are currently used in the numerical modelling of the structural behaviour of earth structures [6].

Two types of mathematical models are used: non-linear elasticity models (based on the deformation theory of plasticity) and models based on the theory of plastic flow.

The simplest non-linear model is the Mohr–Coulomb model (hereinafter referred to as MCM). This model falls within the category of deformation theory models of plasticity. It assumes that, up to the point of shear failure, the relationship between strains and stresses is linear, whilst after the shear strength is reached, strains increase uncontrollably. Accordingly, the MCM is a linear model of ideal plasticity. Many other models utilize the Mohr–Coulomb shear strength condition. A major drawback of the MCM is that it does not account for the “consolidation” effect — the reduction in soil deformability as it becomes more compacted.

A more sophisticated model is the Duncan–Chang hyperbolic model, which is based on the hyperbolic relationship between stresses and strains in soils. The model was developed by J.M. Duncan and C.Y. Chang in 1970. This model belongs to the class of non-linear elasticity models. In this model, the deformation characteristics of the soil (the linear modulus of elasticity E and the bulk modulus B) are treated as variables depending on the stress state, thereby allowing the model to account for the “consolidation” effect in the soil. However, the Duncan–Chang model does not reflect the mechanical processes occurring in the soil, but merely approximates them.

A significant drawback of the hyperbolic model is that it does not explicitly distinguish between the trajectories of active loading and unloading. Plastic flow models are free from this drawback. They are based on the associated flow law, in which it is assumed that the direction of the plastic strain vector is orthogonal to the plasticity (yield) surface.

The yield surface distinguishes, under stress, the regions of elastic and elastoplastic deformation, which correspond to the trajectories of unloading and active loading. Graphically, the yield surface is plotted in the principal stress space or in the space of invariants of the stress tensor (Fig. 1). The quantity p represents the mean stress, which corresponds, up to a factor, to the first invariant of the stress tensor. The quantity q

is referred to as the “deviator stress”; it corresponds, up to a factor, to the second invariant of the stress deviator and to the intensity of the tangential stresses in the case of a plane problem. The quantity q is defined as the difference between the maximum and minimum principal stresses; it is twice the maximum tangential stresses.

Plastic flow models include the Cam-Clay model and the Hardening Soil model (hereinafter referred to as HSM). These models utilize a tent-shaped plasticity surface.

The Cam-Clay model is applied to fine-grained soils. The HSM can also be used for coarse-grained soils, as it takes into account an additional hardening effect — the reduction in soil deformability with increasing compression. In the HSM, the modulus of deformation is not a constant; its value varies as a power function of the lateral compression stress [6].

Different researchers use different models. The MCM is usually employed when modelling small structures. In China, the Duncan–Chang hyperbolic model has become the most widely used; examples of such studies include publications [7, 8]. The Cam-Clay model was used in study [9] to describe the behaviour of clayey soil within the body of a rockfill dam. The HSM is used less frequently than the MCM and the hyperbolic model.

The issue of selecting models and their parameters continues to receive considerable attention. Articles are published on the calibration of models and the selection of their parameters to adequately reproduce soil behaviour during laboratory tests [10–12] or the behaviour of a constructed dam [13].

In the paper by M. Xu et al. [14], experiments in a large-scale stability tester showed that the deformations of a rock filled embankment depend significantly on the loading trajectory.

There are studies which present a comparison of the results of numerical simulations of the structural behaviour of earth dams using different models.

A comparison of the MCM and HSM methods was carried out [15–17]. A comparison of the MCM and HSM methods was conducted in relation to the finite element analysis of the Karkheh rockfill dam (Iran) [17]. A comparison of the MCM and HSM methods was

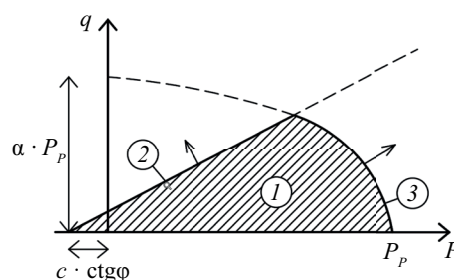


Fig. 1. Schematic diagram of the position of the plasticity surface: 1 — region of elastic deformation; 2 — shear yield surface; 3 — compressive yield surface

carried out for a rockfill dam with a clay core, 59 m in height [15]. It has been shown that accounting for the soil consolidation effect in the HSM leads to a reduction in the calculated dam settlements by approximately 50 %. A study [18] demonstrated that the MCM reproduces the actual behaviour of the dam less accurately than an elastoplastic model based on other principles.

The paper [19] presents a comparison of the hyperbolic model and the HSM using the example of a rockfill dam with a reinforced concrete screen 182 m high.

Furthermore, new soil models are being developed and applied. Papers [12, 20, 21] are devoted to the development of new soil models.

Aims and objectives of the study. The aim of the study is to assess the influence of the soil unloading effect on the formation of the stress-strain state of a high earth dam. This will enable an evaluation of the accuracy of modelling the dam's stress-strain state using the MCM, which does not account for this effect.

MATERIALS AND METHODS

The research methodology involves comparing the results of calculations of the failure surface of an earth dam for two scenarios: one without taking the soil unloading effect into account, and one with it.

Subject of the study. The study was carried out using the example of a 100 m high rockfill dam situated on a rigid foundation. The dam has a symmetrical profile, with a crest width of 10 m and a slope ratio of 2. The calculation was carried out for two types of load: dead weight and hydrostatic pressure from the reservoir. The study considered two types of dam.

The first type of dam is a dam with a thin non-soil screen situated on the upstream slope. A characteristic feature of this type of dam is that the hydrostatic pressure is applied to the watertight upstream slope and therefore not only tends to displace the dam towards the lower reach but also presses against the dam body.

The second type of dam is a dam with a thin vertical diaphragm. A distinctive feature of its operating conditions is that the watertight pressure face is situated within the dam body, whilst the hydrostatic pressure is applied horizontally. This causes additional compression of the dam's downstream bearing prism and reduces compression in the upstream bearing prism. Furthermore, as the reservoir fills, the soil transitions to a suspended state.

In both cases, the stiffness of the dam's anti-seepage element (screen, diaphragm) was not taken into account; the dam was assumed to be homogeneous, consisting solely of a stone rubble fill.

The density of the rock fill was taken as: 2.0 t/m³ when dry, and 2.32 t/m³ when water-saturated.

Research methodology. The calculations were carried out using the PLAXIS software package. The dam body was divided into 1,812 triangular finite elements with 14,829 nodes. The analysis was carried out taking

into account the sequence of construction and loading of the structure. It was assumed that the dam would first be backfilled to the crest in horizontal layers (25 layers), and then the reservoir would be gradually filled to a depth of 96 m. The total number of design stages was 49.

The MIDAS software package allows the calculation of the dam's structural response using several soil models, including MCM and HSM.

In order to identify the influence of a single factor — the unloading effect — on the dam's stress-strain behaviour, it was decided to use a linear model of ideal plasticity. The concept of a linear model implies proportionality between strains and stresses. The modulus of linear deformation of the rock fill was taken as $E = 58$ MPa, and Poisson's ratio as $\nu = 0.27$. The Coulomb – Mohr criterion was adopted as the criterion for ideal plasticity. The angle of internal friction is taken as $\varphi = 43^\circ$, and the specific cohesion as $c = 50$ kPa. The high cohesion of the loose, coarse-grained soil is intended to simulate the interlocking effect between particles. In [10], by analyzing the results of experiments described in [22, 23], it is shown that real rubble fill has even greater cohesion.

The calculation was carried out for two computational models:

Model No. 1 — a model without the unloading effect; this corresponds to the Mohr – Coulomb model.

Model No. 2 — a model with trajectories divided into active loading and unloading phases.

Model No. 2 was derived by simplifying the model of consolidating soil. To reduce the HSM to a linear model, the shear modulus of linear deformation was taken as $E_{50} = E = 58$ MPa, with exponent $m = 0$. The oedometric modulus was calculated using E and Poisson's ratio ν , giving $E_{oed} = 72.47$ MPa.

For the unloading branch, the secant modulus of linear deformation was taken to be $E_{ur} = 116$ MPa, Poisson's ratio $\nu_{ur} = \nu = 0.27$.

The value of the parameter (lateral pressure coefficient) K_{0nc} of the HSM model, which characterizes the shape of the yield surface, was determined separately. It is usually recommended to take $K_{0nc} = 1 - \sin\varphi$; in this case, its value is 0.318. The authors of this study determined this value by trial and error so that the deformations of the dam according to models No. 1 and 2 would coincide during the construction phase.

RESULTS

Stress-strain state of the dam due to its own weight

It is impossible to achieve complete identity in the stress-strain state of the dam for Models 1 and 2; therefore, a value for the parameter K_{0nc} was selected at which the differences would be minimal. This value was $K_{0nc} = 0.43$.

The stress-strain state of the dam due to its own weight, obtained from the calculation, is shown in Fig. 2–7, comparing Models No. 1 and 2. The qualitative picture of the stress-strain state is identical; the difference lies solely in the numerical values.

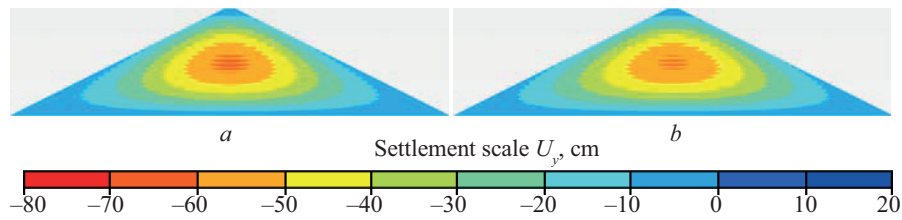


Fig. 2. Settlement of the dam under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

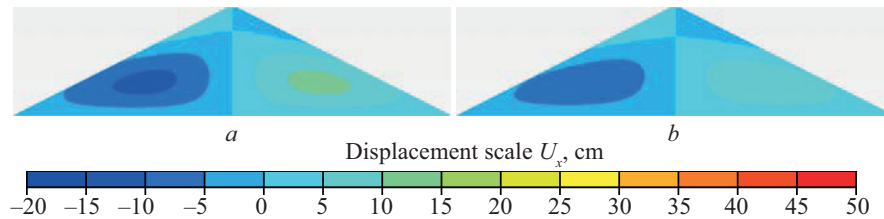


Fig. 3. Horizontal displacements of the dam under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

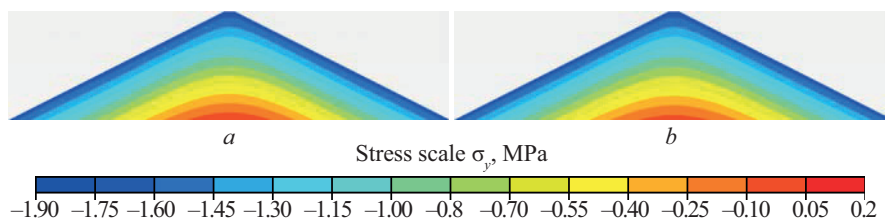


Fig. 4. Vertical stresses in the dam body under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

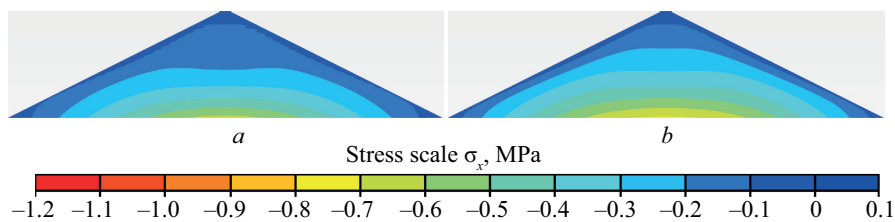


Fig. 5. Horizontal stresses in the dam body under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

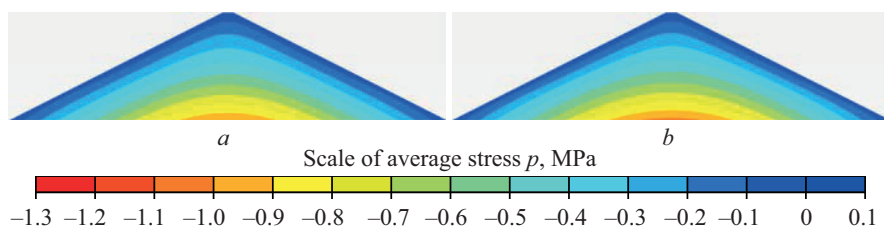


Fig. 6. Average stress in the dam body under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

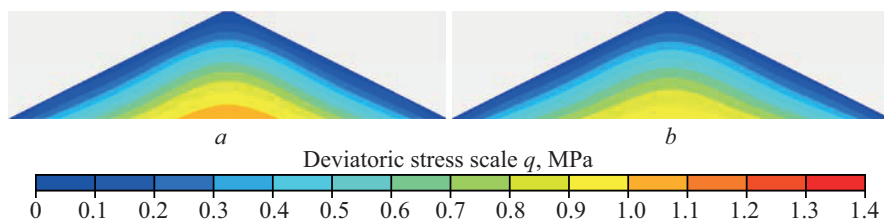


Fig. 7. Deviator stress in the dam body under the action of its own weight: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

As the modelling took into account the sequence of dam construction, the maximum construction settlement is reached in the central part of the dam. The maximum construction settlement of the dam was: in Model No. 1 — 63.0 cm (Fig. 2, *a*), in Model No. 2 — 66.0 cm (Fig. 2, *b*), with a difference of less than 5 %. Settlements of the dam under its own weight are accompanied by lateral expansion of the dam. The maximum horizontal displacement was: 11.4 cm in Model No. 1 (Fig. 3, *a*) and 10.1 cm in Model No. 2 (Fig. 3, *b*), a difference of approximately 10 %.

Normal stresses within the dam body increase with depth and reach a maximum at the toe of the central section of the abutment prism. The maximum vertical stress σ_y in both models was approximately 1.7 MPa (Fig. 4). The distribution of horizontal stresses σ_x is characterized by the formation of a zone of increased compression near the base. The maximum horizontal stress σ_x was 0.67 MPa in model No. 1 (Fig. 5, *a*) and 0.77 MPa in model No. 2 (Fig. 5, *b*), a difference of 14 %.

Since, in the plastic flow model, the position of the yield surface is reflected in the invariant space of the stress tensor, the values of p and q were analyzed. The nature of their distribution is similar to that of the stress distribution σ_y ; they increase gradually with depth, reaching a maximum at the base along the dam axis. The maximum value of the mean stress p was: in Model No. 1 — 1.00 MPa (Fig. 6, *a*), and in Model No. 2 — 1.04 MPa (Fig. 6, *b*). The maximum value of deviatoric stress q was: in Model No. 1 — 1.09 MPa (Fig. 7, *a*), and in Model No. 2 — 1.09 MPa (Fig. 7, *b*). With this q/p ratio, the shear strength of the soil is ensured with a margin of safety.

Stress-strain state of the dam with a screen

The stress-strain state of the dam following the application of hydrostatic pressure to the top face (screen) is shown in Fig. 8–13. The addition of the load primarily affects only the top part of the dam. The extent of these changes differs between Models No. 1 and 2.

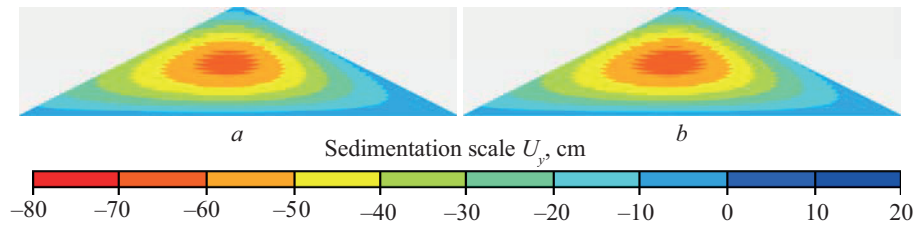


Fig. 8. Settlement of the dam with a screen following the filling of the reservoir: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

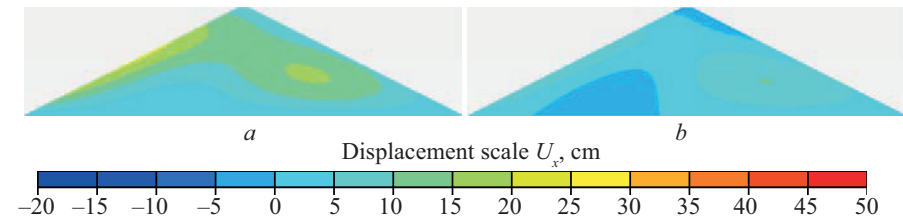


Fig. 9. Horizontal displacements of the dam with a screen after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

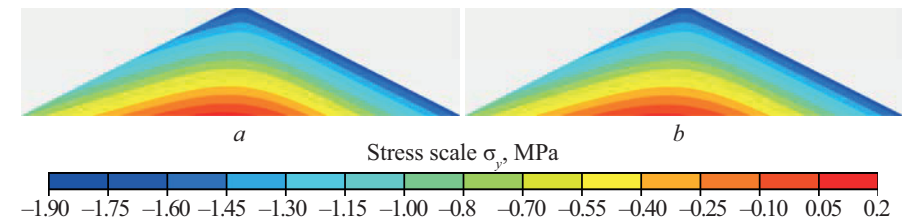


Fig. 10. Vertical stresses in the dam body with a screen after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

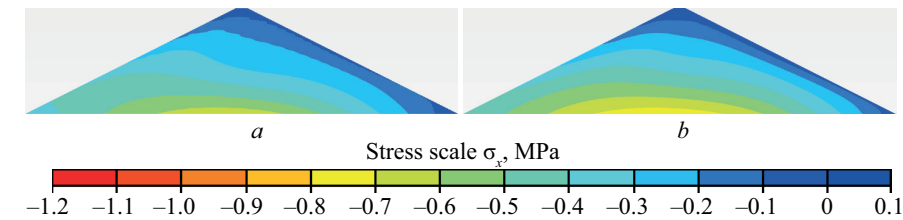


Fig. 11. Horizontal stresses in the dam body with a screen after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

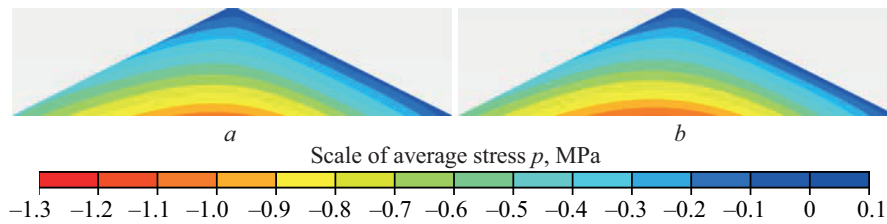


Fig. 12. Average stress in the dam body with a screen after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

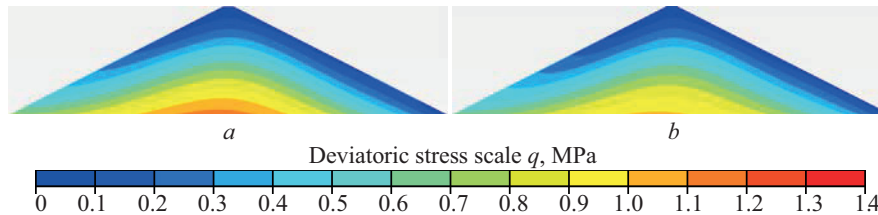


Fig. 13. Deviatoric stress in the dam body with a screen after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

For the dam with a screen in Model No. 1, the settlement of the crest increased from 13 cm (without hydrostatic pressure) to 36.6 cm (Fig. 8, *a*), and in Model No. 2 — to 37.4 cm (Fig. 8, *b*). The maximum settlement of the dam remains virtually unchanged.

The application of hydrostatic pressure led to a significant increase in the dam's displacement towards the lower reservoir. By the time filling was complete, the maximum displacement of the upstream face (screen) was: in Model No. 1 (MCM) — 21.4 cm (Fig. 9, *a*), and in Model No. 2 — just 10.0 cm (Fig. 9, *b*). Let us calculate the increments in displacement due to hydrostatic pressure at the points where they reached their maximum. In Model No. 1 (MCM), the displacements of the screen were: before filling — minus 3.2 cm (Fig. 3, *a*), after filling — 21.4 cm; accordingly, the increase in displacement was 24.6 cm. In Model No. 2 (MCM), the screen displacements were: before filling — minus 6.6 cm (Fig. 3, *b*), after filling — 10.1 cm; accordingly, the increase in displacement was 16.7 cm. Thus, taking the unloading effect into account led to a reduction in the dam's shear displacements by one third.

This significant unloading effect is explained by the specific nature of the stress state that develops after the reservoir is filled. When hydrostatic pressure is applied to the upper part of the dam body, compressive stresses σ_y (Fig. 10) and σ_x (Fig. 11), whilst in the toe of the dam they remain virtually unchanged. Consequently, an increase in the mean stress p (Fig. 12) and

the deviatoric stress q (Fig. 13) occurs only in the crest of the dam; in the toe, they remain constant. Consequently, the soil is subjected to active loading only in the upper part of the dam, whilst in the lower part, the application of additional load is accompanied only by elastic deformations (unloading trajectory).

Stress-strain state of the dam with a diaphragm

The stress-strain state of the dam following the application of hydrostatic pressure to the central diaphragm is shown in Fig. 14–19. It can be seen from Fig. 14–19 that the application of a horizontal load to the diaphragm causes significant changes in the dam's stress-strain state.

Particularly pronounced changes in the stress-strain state are characteristic of Model No. 1 — there is a significant increase in the dam's horizontal displacements. In Model No. 1 (MCM), the maximum horizontal displacement is 48.9 cm (Fig. 14, *a*), which accounts for 78 % of the maximum construction settlement. The maximum displacements occur approximately halfway up the dam's height. The displacements are accompanied by the formation, in the upstream of the dam's abutment prism, of inclined slip surfaces and collapse prisms (Fig. 15, *a*). The maximum settlement of the collapse prism is 76.8 cm.

These deformations are accompanied by an increase in compressive horizontal stresses σ_x in the lower support prism and a sharp drop in these stresses in the upper prism (Fig. 16, *a*). Vertical stresses σ_y in the lower part change only slightly; noticeable changes are charac-

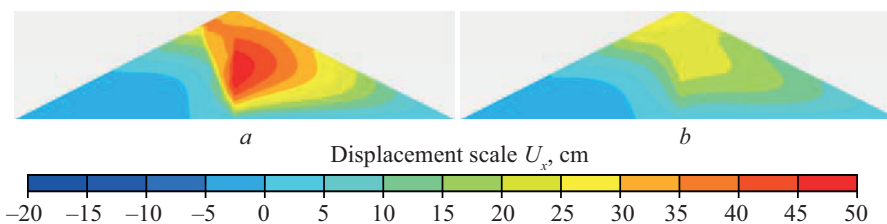


Fig. 14. Displacements of the diaphragm dam after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

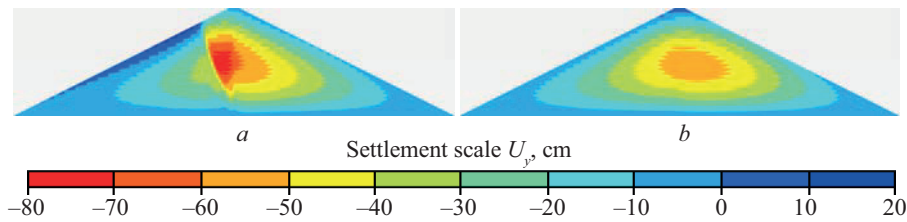


Fig. 15. Settlements of a dam with a diaphragm after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

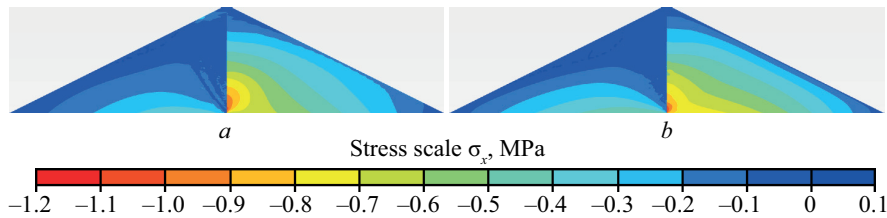


Fig. 16. Horizontal stresses in the body of a diaphragm dam after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

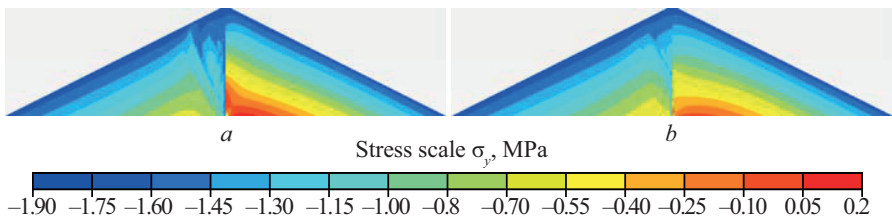


Fig. 17. Vertical stresses in the dam body with a diaphragm after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

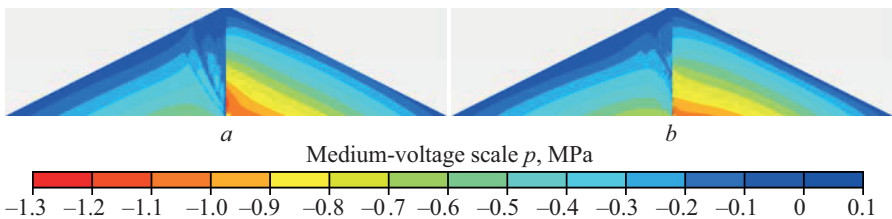


Fig. 18. Average stress in the body of a diaphragm dam after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

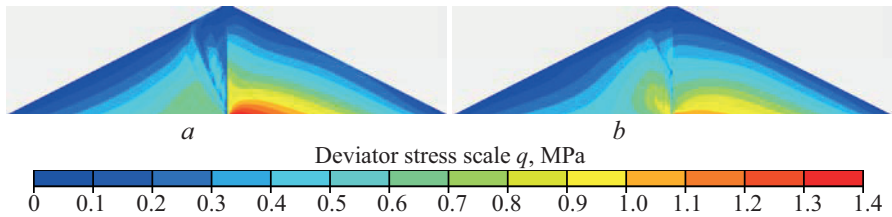


Fig. 19. Deviatoric stress in the body of a diaphragm dam after the reservoir has been filled: *a* — Model No. 1; *b* — Model No. 2

teristic only in the central region of the dam adjacent to the diaphragm (Fig. 17, *a*). In the upper bearing prism, there is a decrease in σ_y due to the buoyancy effect of water on the soil. Meanwhile, in the failure prism, a sharp decrease in compressive stresses is observed.

The formation of a collapse prism in a dam with a diaphragm is confirmed by the findings of V.V. Orekhov [4].

However, in Model No. 2, the application of hydrostatic pressure does not lead to such dangerous changes

in the stress-strain state. The maximum displacement was only 27.3 cm (Fig. 14, *b*), i.e. approximately half that of Model No. 1. The maximum displacements are observed at the crest of the dam.

With such displacements in the dam, no collapse prism forms in the upper part of the dam. In Model No. 2, a reduction in settlement in the dam is clearly visible, which is largely caused by the soil of the upper bearing prism entering a suspended state. The maximum settle-

ment was 58.5 cm (Fig. 15, *b*), i.e. 7.5 cm less than that caused by its own weight.

The significant reduction in displacements in Model No. 2 compared with Model No. 1 clearly demonstrates the influence of the unloading effect on the stress–strain state of a diaphragm dam. To determine the type of loading trajectory (active loading or unloading) of the dam embankment, we shall analyze the stress state of the dam. By comparing the average stresses p (Fig. 6 and 18) and the deviatoric stresses (Fig. 7 and 19) before and after the reservoir is filled, it can be seen that different loading trajectories are characteristic of different zones of the dam. In the upper bearing prism, there is a simultaneous decrease in both the mean stress p and the deviatoric stress; consequently, in this zone, the soil may experience either active loading or unloading. In a large part of the lower bearing prism, an increase in mean stress is observed alongside a simultaneous decrease in deviatoric stress q ; consequently, the soil is unloaded. Accordingly, in Model No. 2, a much smaller volume of the dam undergoes plastic deformation, which explains the reduction in the dam's horizontal displacements.

In addition, a calculation of the dam's structural stability with a diaphragm was carried out for a variant with a lower value of rock fill cohesion — 15 kPa. In this case, according to Model No. 1 (MCM), the dam exhausted its bearing capacity and no solution was obtained. In the calculation using Model No. 2, the horizontal displacements of the dam hardly increased, but a slip surface formed in the upstream prism, leading to the formation of a failure prism. This clearly demonstrates the significant influence of the unloading effect on the stability of a rockfill dam with a diaphragm.

However, it should be noted that the results obtained relate to the chosen method of accounting for the soil consolidation effect by using a plastic flow model for the soil, which is based on the associated flow law. Nevertheless, the associated flow law is often not confirmed

experimentally. Given that the consolidation effect has a significant influence on the results of stress–strain analysis modelling, the question of how to account for loading trajectories requires separate consideration.

CONCLUSION AND DISCUSSION

During the development of the stress–strain state of a dam, the soil may experience different loading histories. When subjected to a load from hydrostatic pressure, one part of the dam body may experience active loading with elastic–plastic deformations, whilst another may experience unloading with elastic deformations. This is particularly characteristic of dams with an internal diaphragm; in this type of dam, the soil in the upper and lower bearing prisms has different loading histories.

Taking into account the fact that part of the dam does not undergo plastic deformation when subjected to a load leads to a significant change in the results of the numerical simulation of the structural system.

The change in the results of the dam stability analysis is primarily reflected in a substantial reduction in the horizontal displacements of the dam caused by hydrostatic pressure. In the example considered, the maximum horizontal displacement of the dam with a watertight screen and the dam with a central diaphragm was reduced by approximately a factor of 2.

Taking the soil consolidation effect into account when calculating the ultimate limit state of a dam with a diaphragm leads to a significant increase in the dam's bearing capacity margin. The reduction in horizontal displacements significantly lowers the risk of loss of shear strength in the soil of the upstream abutment prism and the formation of a collapse prism within it.

The use of models that do not account for the soil hardening effect, such as the Mohr – Coulomb model, in the design of earth dams is unacceptable. It severely distorts the results of numerical modelling.

REFERENCES

1. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories. *Géotechnique*. 2018; 68(9):749-771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095
2. Park H.G., Kim Y.-S., Seo M.-W., Lim H.-D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2005; 21(7):91-105.
3. Soroka V.B., Sainov M.P., Korolev D.V. Concrete-faced rockfill dams: experience in study of stress–strain state. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(2):(125):207-224. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.207-224. EDN YXZHQD. (rus.).
4. Orekhov V.V. Stability of earth dam with a vertical core. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 1:143-149. EDN VJIGEB. (rus.).
5. Bellendir E.N., Rubin O.D., Yurjev S.V., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. Analysis of the results of field and computational studies of the strength and stability of the stone-fill dam of the boguchanskaya hydroelectric power station, predicting its condition. *Prirodoobustroystvo*. 2024; 2:48-56. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-2-48-56. EDN ZEJWK. (rus.).
6. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Constitutive mathematical soil models in geotechnical practice : Review. *Natural And Technical Sciences*. 2019; 5(131):

240-247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04. EDN KGJTQF. (rus.).

7. Gao Ju., Han X., Han W., Dang F., Ren J., Xue H. et al. Research on the slip deformation characteristics and improvement measures of concrete-faced rockfill dams on dam foundations with large dip angles. *Scientific Reports*. 2024; 14(1):8665. DOI: 10.1038/s41598-024-59222-0. EDN MPULSO.

8. Chen H., Liu D. Numerical simulations of multiple cracks in concrete face rockfill dams coupled multi-factor during construction. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22:e04609. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04609. EDN EZGBDK.

9. Liu S., He W., Sun Yi., Shen Ch., Wang L. Analysis of the behavior of a high earth-core rockfill dam considering particle breakage. *Computers and Geotechnics*. 2023; 157:105320. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105320. EDN AKTNOQ.

10. Sainov M.P., Kotov F.V. Parameters of a hardening soil model for modeling highembankment dams. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024; 10(2):56-67. EDN FJGMOI. (rus.).

11. Sukkarak R., Jongpradist P., Pramthawee P. A modified valley shape factor for the estimation of rockfill dam settlement. *Computers and Geotechnics*. 2019; 108:244-256. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.001

12. Liu S., Sun Y., Shen C., Yin Z. Practical nonlinear constitutive model for rockfill materials with application to rockfill dam. *Computers and Geotechnics*. 2020; 119:103383. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103383

13. Vahdati P., Levasseur S., Mattsson H., Knutsson S. Inverse Hardening Soil Parameter Identification of an Earth and Rockfill Dam by Genetic Algorithm Optimization. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014; 19:3327-3349.

14. Xu M., Song E., Chen J. A large triaxial investigation of the stress-path-dependent behavior of compacted rockfill. *Acta Geotechnica*. 2012; 7:167-175. DOI: 10.1007/s11440-012-0160-0. EDN DWAMYP.

15. Bhutto A.H., Zardari S., Zardari M.A., Bhurgri G.S., Memon B.A., Bhanbhro R. et al. Mohr-Coulomb and Hardening Soil Model Comparison of the Settlement

of an Embankment Dam. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019; 9(5):4654-4658. DOI: 10.48084/etasr.3034

16. Kotov F.V., Sainov M.P. Parameters of non-linear models of soil for analysis of stress-strain state of a rockfill dam. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(3):28-56. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.28-56. EDN WARIUO. (rus.).

17. Samadi-Boroujeni H., Haghshenas-Adarnabadi A., Shayannejad M., Khabbaz H. Comparison of Mohr-Coulomb and hardening soil constitutive models for simulation of settlements in the Karkheh earth dam. *Australian Geomechanics Journal*. 2023; 58(3):143-158. DOI: 10.56295/AGJ5836. EDN CZDECJ.

18. Dong W., Hu L., Yu Y.Z., Lv H. Comparison between Duncan and Chang's EB Model and the Generalized Plasticity Model in the Analysis of a High Earth-Rockfill Dam. *Journal of Applied Mathematics*. 2013; 2013:1-12. DOI: 10.1155/2013/709430

19. Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W. Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2011; 33(3).

20. Sukkarak R., Pramthawee P., Jongpradist P. A modified elasto-plastic model with double yield surfaces and considering particle breakage for the settlement analysis of high rockfill dams. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(3):734-745. DOI: 10.1007/s12205-016-0867-9. EDN KOOEXH.

21. Jongpradist P. Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects. *Geomechanics and Engineering*. 2018; 14(3):211-224. DOI: 10.12989/gae.2018.14.3.211

22. Marsal R.J. Large Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1967; 93(2):27-43. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000958

23. Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y. Research on the Particle Breakage of Rockfill Materials during Triaxial Tests. *International Journal of Geomechanics*. 2017; 17(10). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000977

Received February 17, 2026.

Adopted in revised form on February 19, 2026.

Approved for publication on March 14, 2026.

BIONOTES: Mikhail P. Sainov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Build and Hydraulic Structures; **National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 2369-9626, Scopus: 6506150284, ORCID: 0000-0003-1139-3164; SainovMP@mpei.ru;

Nikita S. Talalaev — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1227780, Scopus: 59319522100, ResearcherID: PNG-6395-2026, ORCID: 0009-0001-9424-9661; talalaevnicita@yandex.ru.

Author contributions:

Mikhail P. Sainov — scientific supervision, research concept, data collection, methodology development, writing the original text, article design, and scientific editing.

Nikita S. Talalaev — data collection and processing, calculations, methodology development, and article design and editing.

The authors declare no conflicts of interest.

Мероприятия по минимизации осадок фундамента нового объекта строительства

Серафима Михайловна Сельвиан, Ульяна Олеговна Московкина,
Екатерина Алексеевна Софронова, Дарья Дмитриевна Антропова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С увеличением плотности застройки нарастает дефицит площадок строительства с достаточно высокими физико-механическими характеристиками грунтов основания, не требующими реализации дополнительных мероприятий улучшения свойств грунтов или применения фундаментов глубокого заложения. В связи с этим все чаще при проектировании возникает необходимость в повышении несущей способности оснований и фундаментов для уменьшения деформаций и предотвращения обрушений, что особенно важно в условиях современного строительства в крупных населенных пунктах.

Материалы и методы. Существует множество методов усиления грунтов, включая механические, химические и физико-химические. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, а также области применения в зависимости от конкретных условий и требований проекта. В последние годы наблюдается активное развитие новых технологий, таких как инъекционные методы, использование геосинтетических материалов и других, что открывает новые горизонты для повышения эффективности и устойчивости конструкций. Рассмотрены варианты усиления основания методом Jet Grouting (струйная цементация грунтов) и устройства свайного фундамента с применением разрядно-импульсной технологии (РИТ) применимо к конкретному объекту в сложившихся условиях застройки и инженерно-геологических условиях.

Результаты. Проанализированы некоторые современные технологии усиления грунтов в конкретных условиях на конкретном объекте строительства и их эффективность в данных условиях. Выполнены численное моделирование здания на усиленном основании методом Jet Grouting и устройство свайного фундамента с применением РИТ.

Выводы. Представлены результаты численного моделирования. Выбор метода зависит от инженерно-геологических условий, требуемой несущей способности грунтов основания и других факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усиление грунтов, Jet Grouting, разрядно-импульсная технология, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, геотехнические решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сельвиан С.М., Московкина У.О., Софронова Е.А., Антропова Д.Д. Мероприятия по минимизации осадок фундамента нового объекта строительства // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://Inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.2

Автор, ответственный за переписку: Ульяна Олеговна Московкина, moskovkina.u@mail.ru.

Measures to minimize foundation settlement in a new construction project

Serafima M. Selviyan, Ulyana O. Moskovkina,
Ekaterina A. Sofronova, Daria D. Antropova

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

ABSTRACT

Introduction. Excessive building density worsens the lack of foundation soils that have sufficiently high physical and mechanical properties and therefore do not require additional soil improvement measures or deep foundations. Accordingly, design practice increasingly requires enhancing the bearing capacity of subsoil and foundations to reduce deformations and prevent failures, which is particularly important for the present-day construction practice in large urban areas.

Materials and methods. There are numerous soil improvement methods, including mechanical, chemical, and physico-chemical techniques. Each approach has advantages and limitations, as well as fields of application determined by project-specific conditions and requirements. In recent years, new technologies, such as grouting methods and geosynthetic materials, have been actively developed, opening up new opportunities for improving structural performance and stability. This study considers foundation-soil improvement using Jet Grouting (jet grouting of soils) and construction of a pile foundation using discharge-pulse technology (DPT) as applied to a specific facility under existing development and geoengineering conditions.

Results. Several modern ground improvement technologies were analyzed for the specific conditions of a particular construction site, and their effectiveness was evaluated. Numerical modeling was performed for a building on a Jet Grouting-improved foundation soil and for a pile foundation constructed using DPT.

Conclusions. The results of numerical modeling are presented. The choice of methods depends on geoenvironmental conditions, the required bearing capacity of the foundation soils, and other factors.

KEYWORDS: ground improvement, Jet Grouting, discharge-pulse technology, stress-strain state, numerical modeling, geotechnical solutions

FOR CITATION: Selviyan S.M., Moskovkina U.O., Sofronova E.A., Antropova D.D. Measures to minimize foundation settlement in a new construction project. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.2

Corresponding author: Ulyana O. Moskovkina, moskovkina.u@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проектируемое сооружение представляет собой многоквартирный дом с подземной автостоянкой с габаритами в плане (Д × Ш): 48,65 × 38,5 м:

- количество этажей: 25–45 надземных и 2 подземных (под всей площадью);
 - высота здания: 81,3–151,35 м.
- Предусматривается 2-этажная подземная парковка (укрытие ГО ЧС):
- основные несущие конструкции: монолитный железобетонный каркас;
 - предельные величины средних осадок оснований фундаментов: $S_u = 15,0$ см;
 - глубина сжимаемой толщи: 22,4 м.

В геоморфологическом отношении участок работ расположен на 3-й надпойменной террасе. Рельеф участка относительно ровный, искусственно спланированный, характеризуется абсолютными высотными отметками поверхности порядка 150,00–151,50 м.

В геологическом отношении на площадке до глубины 52,0 м принимают участие четвертичные отложения следующих стратиграфических комплексов (сверху вниз):

- техногенные грунты (t-QIV), залегают с поверхности до глубины порядка 0,5–2,0 м;
- среднечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (a,f-QIIms), залегают на глубине 0,5–2,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 149,50–151,00 м, и представлены песками и суглинками, общей мощностью 10,0–15,0 м;
- среднечетвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения (f,lg-QIIms), залегают под аллювиально-флювиогляциальными отложениями на глубине 12,0–15,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам порядка 136,00–138,00 м, и представлены песками, супесями, суглинками, мощностью 1,2–6,0 м;
- нижнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения внуковской серии донского горизонта (a,f-QIVk-ds), залегают на глубине 14,5–17,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 134,50–135,50 м, и представлены песками, супесями, суглинками, мощностью 7,5–12,5 м.

Четвертичные отложения на глубине 34,0–36,0 м от уровня дневной поверхности, что соответствует абсолютным высотным отметкам 118,00–120,00 м, подстилаются коренными отложениями (сверху вниз):

- нижнемеловые отложения кунцевской и люберецкой толщи берриаса, ростовской свиты нижнего готерива, дяковской толщи, савельевской и грмячевской свит верхнего готерива объединенные (K1kp-gr) залегают под четвертичными отложениями и представлены песками мощностью до 2,0 м;
 - верхнеюрские-нижнемеловые отложения лопатинской свиты (J3-K1lp) залегают на глубине 32,0–34,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 114,00–116,00 м, представлены песками мощностью 2,0–4,0 м;
 - верхнеюрские отложения филевской и егорьевской свит нерасчлененные (J3fl+eg) залегают на глубине 37,5–39,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 111,00–113,50 м, представлены песками мощностью 2,0–4,0 м;
 - средне-верхнеюрские отложения великодворской-ермолинской свит (J2-3vd-er) залегают на глубине 40,0–42,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 108,50–110,50 м, представлены глинами мощностью 15,0–17,0 м;
 - среднеюрские отложения чулковской свиты (J2chl) залегают на глубине 57,0–58,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 92,00–93,50 м, представлены песчанистыми глинами и глинистыми песками мощностью более 3,0 м;
 - верхнекаменноугольные отложения хамовнической свиты, верхней (неверовской) подсвиты (C3hm2) залегают на глубине 57,0–59,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 92,00–93,00 м, представлены глинами с прослоями мергелей мощностью 1,0–3,0 м;
 - верхнекаменноугольные отложения хамовнической свиты, нижней (ратмировской) подсвиты (C3hm1) залегают на глубине 59,0–62,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 89,00–91,00 м, представлены известняками мощностью более 4,5 м.
- Гидрогеологические условия участка характеризуются наличием надьюрского водоносного комплекса, подземные воды которого вскрыты на глубине 9,0–11,5 м, что соответствует абсолютным высотным

отметкам 140,00–141,00 м. Горизонт носит безнапорный характер.

На площадке строительства выделено 16 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Перечень ИГЭ и рекомендуемые физико-механические характеристики грунтов для модели Hardening Soil для программного комплекса (ПК) Plaxis представлены в табл. 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для уменьшения прогнозных деформаций основания здания в рамках исследования рассмотрены две технологии устройства дополнительных мероприятий [1–3].

Jet Grouting (струйная цементация) — технология усиления грунтов, основанная на использовании

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов для модели Hardening Soil для программного комплекса Plaxis

Номер и наименование ИГЭ	P_{ref}	Коэффициент переуплотнения OCR	Олометрический модуль деформации E_{ed}^{ref}	Степенной показатель зависимости жесткости от уровня напряжений m	Коэффициент бокового давления грунта K_{0nc}	Секущий модуль деформации E_{50}^{ref}	Модуль деформации повторного нагружения E_{ur}^{ref}	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент Пуассона повторного нагружения ν_{ur}	Угол дилатансии ψ
	кПа	–	МПа	–	–	МПа	МПа	–	–	град
ИГЭ-2а. Пески мелкие, рыхлые, влажные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	12,1	0,27	0,31	13,7	72,2	0,32	0,28	8,8
ИГЭ-2б. Пески мелкие с прослоями средней крупности, средней плотности, влажные и водонасыщенные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,1	0,33	0,29	21,6	107,0	0,32	0,25	6,0
ИГЭ-2в. Пески мелкие с прослоями средней крупности, плотные, влажные и водонасыщенные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,9	0,33	0,29	26,2	143,1	0,27	0,23	7,5
ИГЭ-4. Супеси пластичные песчанистые, с прослоями суглинков легких, песчанистых, с прослоями и гнездами песков средней крупности, с дресвой и щебнем ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	1,0	6,6	0,31	0,31	6,1	78,4	0,34	0,32	–
ИГЭ-4а. Пески средней крупности с прослоями крупных, местами глинистые, с прослоями суглинков и супесей, с дресвой и щебнем, средней плотности, водонасыщенные ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	–	15,5	0,24	0,28	17,8	121,3	0,30	0,27	8,8
ИГЭ-4б. Пески средней крупности с прослоями крупных, местами глинистые, с прослоями суглинков и супесей, с дресвой и щебнем, плотные, водонасыщенные ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,3	0,24	0,30	18,6	128,8	0,27	0,24	9,5
ИГЭ-5. Супеси пластичные, с прослоями суглинков, реже глин ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	290	1,9	28,8	0,28	0,65	24,2	157,8	0,30	0,28	–
ИГЭ-7а. Пески мелкие с прослоями пылеватых, средней плотности, водонасыщенные ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	100	–	12,9	0,32	0,32	18,5	118,9	0,30	0,26	8,6
ИГЭ-7б. Пески мелкие с прослоями пылеватых, плотные, водонасыщенные ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	100	–	17,2	0,28	0,34	23,7	152,4	0,31	0,24	11,1

Окончание табл. 1

Номер и наименование ИГЭ	P_{ref}	Коэффициент пересуплотнения OCR	Одометрический модуль деформации E_{oed}^{ref}	Степенной показатель зависимости жесткости от уровня напряжений m	Коэффициент бокового давления грунта K_{0}^{nc}	Секущий модуль деформации E_{50}^{ref}	Модуль деформации повторного нагружения E_{ur}^{ref}	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент Пуассона повторного нагружения ν_{ur}	Угол дилатансии ψ
	кПа	–	МПа	–	–	МПа	МПа	–	–	град
ИГЭ-8. Пески средней крупности с прослоями крупных, плотные с прослоями средней плотности, водонасыщенные (a,f–Q ₁ ^{vk-ds})	170	–	29,0	0,39	0,27	35,1	156,4	0,35	0,29	13,1
ИГЭ-10. Глины полутвердые, сильнопесчанистые, с частыми прослоями (переслаивание) песков пылеватых и мелких (J ₃ –K ₁ lp)	440	1,3	17,4	0,37	0,65	20,5	157,7	0,33	0,31	–
ИГЭ-11. Глины полутвердые с прослоями супесей и песков, с включением фосфоритов (J ₃ fl+eg)	400	1,5	13,2	0,61	0,52	17,3	139,5	0,41	0,34	–
ИГЭ-12. Глины полутвердые с прослоями твердых (J ₂₋₃ vd–er)	590	1,7	27,5	0,55	0,71	20,4	141,0	0,42	0,39	–

энергии высоконапорной струи цементного раствора [4–6].

Выделяют три разновидности технологии Jet Grouting [7]:

- Jet 1 (однокомпонентная) — для разрушения и смешивания используется только цементная струя. Диаметр колонн из грунтоцемента зависит от типа почвы: для глинистых грунтов — 500–600 мм, для песчаных — 700–800 мм;
- Jet 2 (двухкомпонентная) — цементная струя усиливается потоком сжатого воздуха, что увеличивает энергию и диаметр сваи. Особенно эффективна в глинистых грунтах, где требуется большая энергия для качественного перемешивания;
- Jet 3 (трехкомпонентная) — для разрушения и выноса частиц укрепляемого грунта используют двойную струю из воды и воздуха, после чего отдельной форсункой подают цементный раствор. Этот метод позволяет достичь максимальной прочности сваи и создавать элементы большого диаметра.

Преимущества технологии струйной цементации Jet Grouting [8]:

- предсказуемость результатов струйного укрепления грунтов;
- высокая производительность (до 300 пог. м Jet-свай в сутки);
- возможность работы в стесненных условиях (в подвальных помещениях, вблизи существующих зданий, на откосах) [9];

- возможность подведения Jet-свай под существующие фундаменты (позволяет через отверстие 100 мм выполнять сваи диаметром 300–700 мм);
- возможность устройства Jet-свай в обводненных грунтах.

Технология усиления грунтов с применением разрядно-импульсных свай (РИТ свай) (разрядно-импульсная технология) — метод устройства буринъекционных свай с помощью импульсного электрического тока.

Бетонную смесь, уложенную в скважину, подвергают импульсному воздействию электрического тока с применением специального излучателя. Высоковольтные электрические разряды вызывают электро-взрывы. Благодаря электрогидравлическому эффекту тело сваи расширяется на локальных участках, в том числе в районе пяты [10–14].

В результате [15]:

- диаметр скважины увеличивается в 2 раза и более;
- свая прочно держится в грунте и выдерживает высокие вертикальные и горизонтальные нагрузки;
- окружающий грунт уплотняется, цементируется, что добавляет прочности конструкции [16].

Преимущества РИТ:

- возможность ведения работ из нижнего помещения с высотой потолков не менее 2,4 м (из подвала, цокольного или первого этажей);
- возможность проходки без использования обсадной трубы на слабых грунтах при осыпании стен скважины;

Табл. 2. Сводная таблица результатов расчетов для выбора типа усиления основания

Проектное решение	Характеристики основания/ фундамента	Требуемая осадка, см	Количество свай на площадке размерами 10 × 10 м	Объем свай на площадке размерами 10 × 10 м при глубине толщи, равной длине свай/глубине массива, м³	Прогнозируемая осадка, см
Плита на естественном основании	ИГЭ-2б (см. рис. 2)	15	—	—	20,85
Плита на укрепленном массиве грунта методом Jet Grouting	$E = 261,95 \text{ МПа}$, размеры массива: $h = 12,8 \text{ м}$, $d = 0,6 \text{ м}$, шаг = 0,9 м		121	1548,8	9,87
	$E = 224,68 \text{ МПа}$, размеры массива: $h = 11,0 \text{ м}$, $d = 0,6 \text{ м}$, шаг = 0,9 м			1331	12,36
Сваи РИТ	$d = 350 \text{ мм}$, шаг = 1,4 м, длина = 15 м		49	735*	19,62
	$d = 350 \text{ мм}$, шаг = 1,4 м, длина = 25 м			1225*	8,8

Примечание: * — объем свай РИТ рассчитывался без учета уширений.

• несущая способность свай, изготовленных по РИТ, — до 2,5 раз выше, чем у свай, изготовленных по другим технологиям.

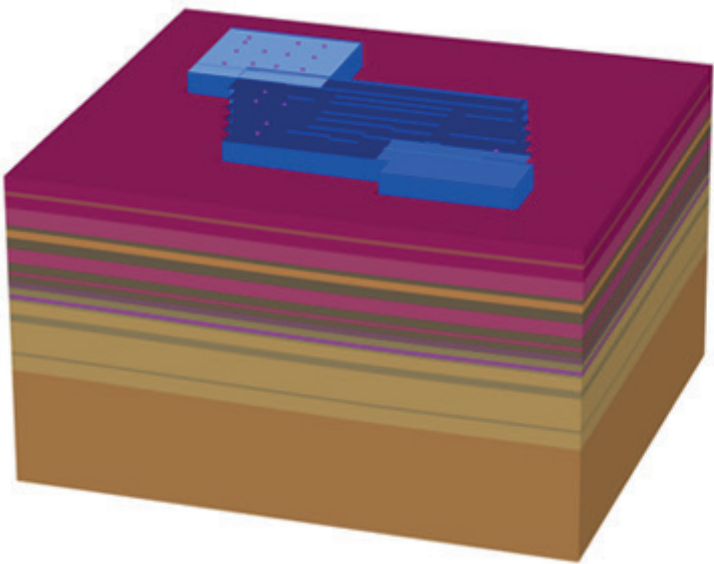
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выбора типа фундамента были произведены расчеты для нескольких вариантов, таких как:

1. Фундаментная плита на естественном основании.

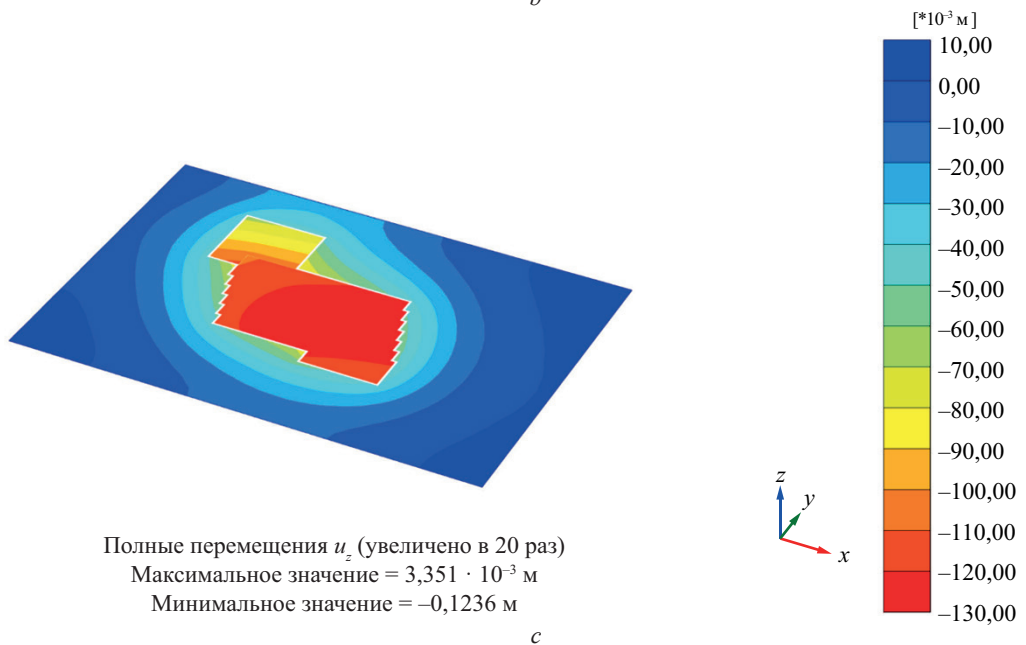
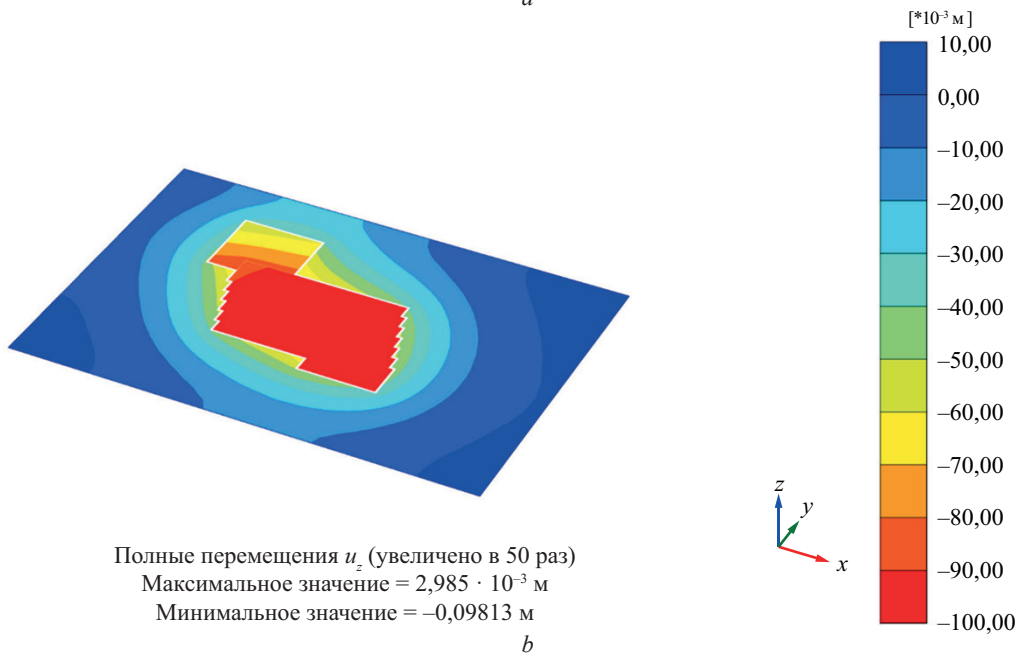
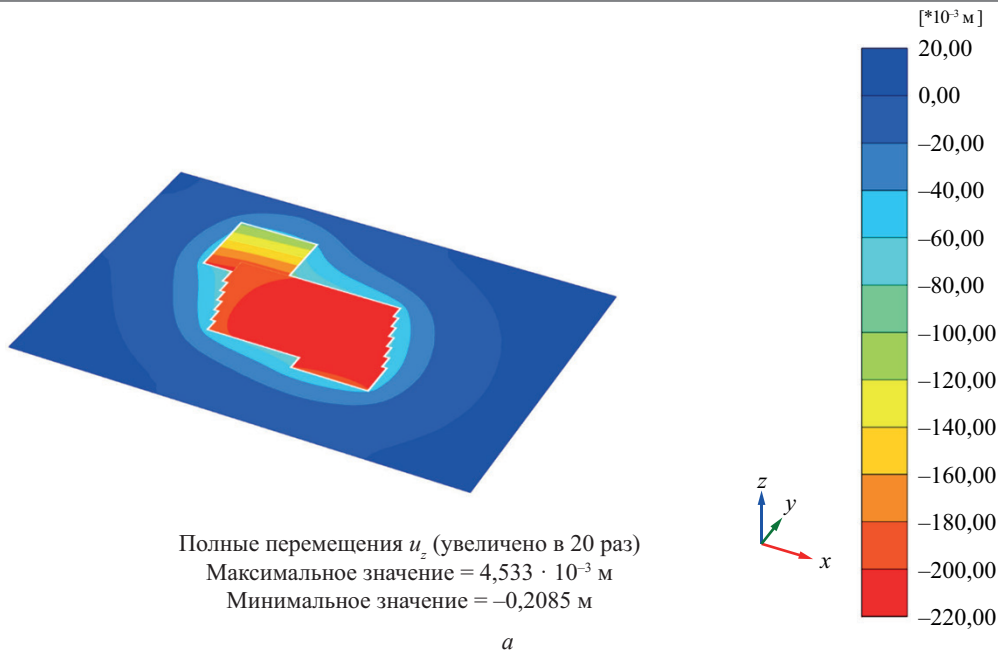
2. Усиление основания по технологии Jet Grouting:

- глубина устройства 15,0 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м;
- глубина устройства 12,8 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м;
- глубина устройства 11,0 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м.



Деформированная сетка $|u|$ (увеличено в 5 раз)
Максимальное значение = 0,3967 м (в узле 139 672)

Рис. 1. Расчетная схема



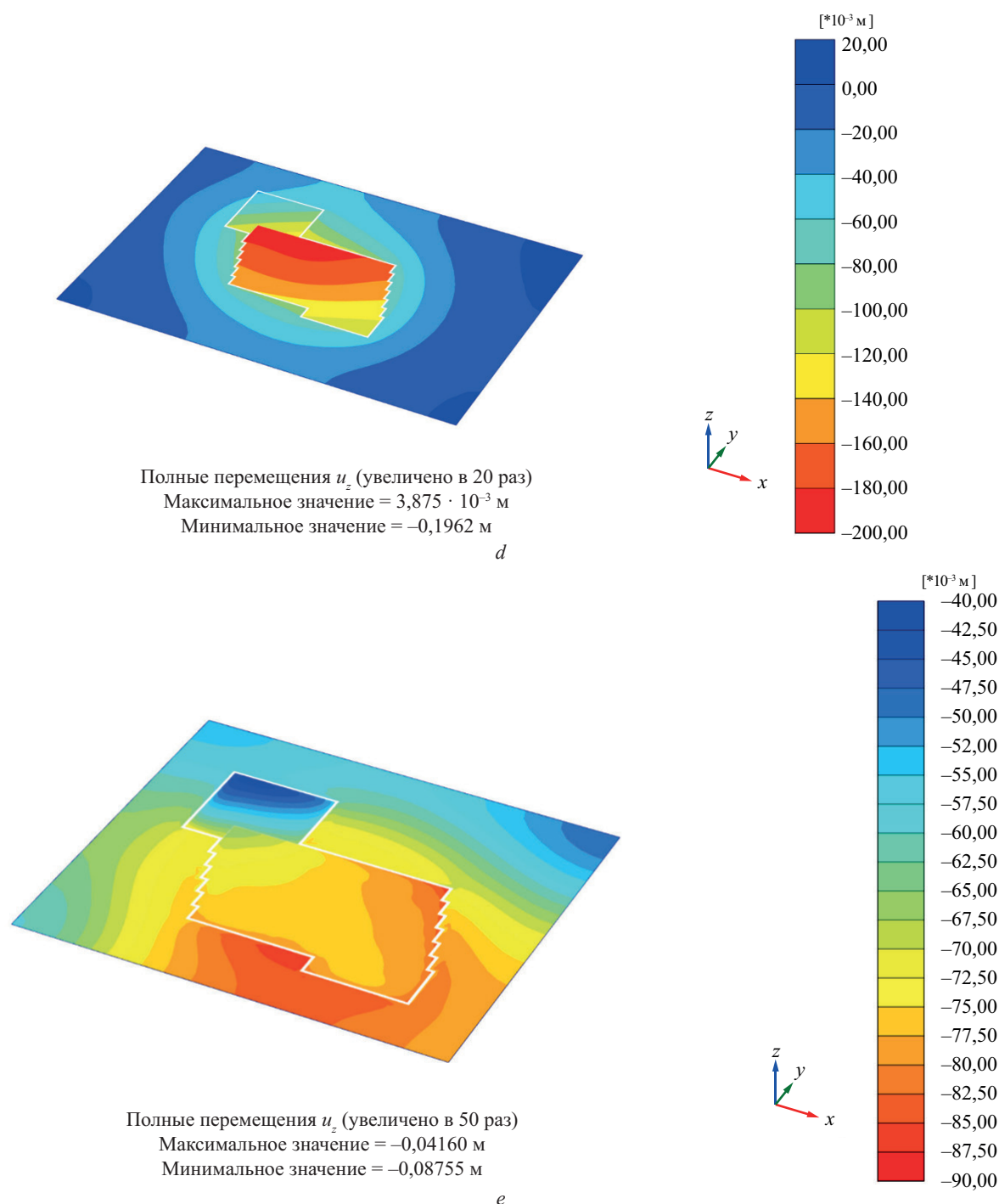


Рис. 2. Вертикальные перемещения: a — здания на естественном основании; b — основания при использовании технологии Jet Grouting на глубину 12,8 м; c — основания при использовании технологии Jet Grouting на глубину 11,0 м; d — основания при использовании свай РИТ на глубину 15,0 м; e — основания при использовании свай РИТ на глубину 25,0 м

3. Устройство фундаментов из свай РИТ:

- длина свай 15,0 м, шаг свай 1,4 м, диаметр свай 0,35 м;
- длина свай 25,0 м, шаг свай 1,4 м, диаметр свай 0,35 м.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Красным цветом выделены значения полученной расчетами осадки, превышающей допустимые. В табл. 2

также приведены количество и объемы свай на площадке 10×10 м, глубиной, принятой в зависимости от типа выбранных дополнительных мероприятий, равной глубине массива из Jet-свай и длине РИТ-свай.

По результатам оценки прогнозируемых деформаций проектируемого здания определено, что перемещения и относительные деформации фундамента на естественном основании превышают предельные

допустимые [17–20]. Требуется предусмотреть дополнительные мероприятия для обеспечения сохранности и безопасной эксплуатации проектируемого здания.

Сводная информация по результатам расчетов приведена в табл. 2.

Результаты расчетов в ПК Plaxis 3D приведены на рис. 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение дополнительных мероприятий на рассмотренной площадке строительства может способствовать минимизации прогнозируемых деформаций при возведении проектируемого здания.

2. Удовлетворение требований по второй группе предельных состояний может быть обеспечено при использовании различных вариантов дополнительных мероприятий:

- устройство грунтоцементного массива по технологии Jet Grouting в рассмотренных вариантах глубины 11,0 и 12,8 м;
- устройство свайного фундамента по технологии РИТ диаметром 350 мм с длиной свай 25 м по сетке $1,4 \times 1,4$ м.

3. Учитывая скорости производства работ при реализации различных вариантов, а также необходимые глубины свай, оптимальным решением в представленном случае является применение технологии Jet Grouting для усиления грунта основания на глубину 11,0 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Базаров Ж.В., Филиппова Е.В. Технологии цементационного закрепления грунтов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сб. ст. XXI Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 14–22. EDN RJSURE.

2. Щуклинов С.П., Нефедова В.К. Технология Jet-Grouting — современный метод строительства на слабых грунтах // Петербургская школа поточной организации строительства : I Всеросс. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения профессора Виктора Алексеевича Афанасьева. 2018. С. 88–92. EDN XWNMCD.

3. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 60–62. EDN NSDYTB.

4. Шашкин А.Г., Богов С.Г. Использование технологии Jet Grouting при устройстве подземного объема в условиях слабых глинистых грунтов // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 27–33. EDN SMVCNX.

5. Моисеева Ю.А., Токарева Ю.А., Калошина С.В. Сравнительная характеристика систем струйной цементации Jet-1, Jet-2, Jet-3 // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 1. С. 425–430. EDN XQZULB.

6. Прокопенко Д.В., Быховцев В.Е., Киргинцева С.В. Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2014. № 6 (87). С. 129–132. EDN TDOVON.

7. Тер-Мартirosян З.Г., Еремин В.Я., Буданов А.А. Обоснование методики расчета несущей способности грунта под нижним концом висячих свай-РИТ // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики механики грунтов и фундаментостроения : мат. академических

чтений по геотехнике и Междунар. совещания ведущих кафедр. 2006. С. 122.

8. Кубецкий В.Л., Еремин В.И. Применение свай-РИТ в фундаментах высотных зданий // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 240–245. EDN PABGXJ.

9. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Способ контроля и прогнозирования параметров и прочности jet-свай при производстве работ // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 2 (13). С. 41–50. EDN YLGAMV.

10. Lomov P.O., Lanis A.L., Razuvaev D.A., Kavadakov M.G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions // Sciences in Cold and Arid Regions. 2021. Vol. 13. Issue 5. Pp. 357–365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040. EDN DKSADH.

11. Серова Е.А., Чунюк Д.Ю. Качественный анализ составляющих геотехнического риска при строительстве подземных и заглубленных сооружений // Вестник МГСУ. 2010. № 4–4. С. 136–143. EDN RTSDWZ.

12. Богданов А.С. Преимущества геотехнической технологии струйной цементации грунтов (Jet-Grouting) // Fundamental Science and Technology : сб. науч. ст. по мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 221–233. EDN UVAIBS.

13. Бондарь С.П., Чигарев А.Г. Технология jet-grouting: эффективное решение для фундаментов на слабых грунтах // Научный MEGAFEST 2025 : сб. ст. Междунар. науч.-исследов. конкурса. 2025. С. 13–17. EDN PЕННJT.

14. Быховцев В.Е., Прокопенко Д.В., Цурганова Л.А. Расчет РИТ-свай по первому предельному состоянию // Проблемы физики, математики и техники. 2015. № 3 (24). С. 90–93. EDN UNFMDL.

15. Галаветдинов В.З., Давиденко Б.Ю., Еремин В.В. Эффективность применения разрядно-импульсной технологии в сложных геологических

условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 181–186. EDN TJYGAV.

16. Triantafyllidis Th., Schäfer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2007. Vol. 2. Pp. 683–688.

17. Галимнурова О.В., Галимнуров И.П., Самофеев Н.С. К эффективности использования свай разрядно-импульсной технологии при реконструкции зданий и сооружений // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 2. С. 62. EDN TCESOD.

18. Чунюк М.С. Применение технологии jet-grouting при новом строительстве, как альтернатива традиционным свайным фундаментам // Экономика строительства. 2023. № 4. С. 264–266. EDN ZXOJ VX.

19. Грязнова Е.М., Гаврилов А.Н., Чунюк Д.Ю., Борчев К.С. Геотехнический мониторинг в строительстве : учебное пособие. М., 2016. 80 с. EDN ZGASEV.

20. Abbott K.W., Levi-Faur D., Snidal D. Theorizing regulatory intermediaries: The RIT model // The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science. 2017. Vol. 670. Issue 1. Pp. 14–35. DOI: 10.1177/0002716216688272

Поступила в редакцию 21 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 2 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Серафима Михайловна Сельвиан — старший преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1104084, Scopus: 57209301023, ORCID: 0000-0003-0288-0550; SelviyanSM@mgsu.ru;

Ульяна Олеговна Московкина — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; moskovkina.u@mail.ru;

Екатерина Алексеевна Софронова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; soka280204@gmail.com;

Дарья Дмитриевна Антропова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; antrdari@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The designed structure is an apartment building with an underground parking garage and plan dimensions ($L \times W$) of 48.65 × 38.5 m:

- number of stories: 25–45 above-ground and 2 underground (under the entire building area);
- building height: 81.3–151.35 m.

A two-level underground parking facility (a civil defense and emergency shelter) is constructed; it has:

- principal load-bearing structures: a cast-in-place reinforced concrete frame;
- limiting values of average settlement of foundation soils: $S_u = 15.0$ cm;
- depth of the compressible soil mass: 22.4 m.

The site is located on the third terrace above the floodplain. The terrain is relatively flat and artificially planned; its absolute ground-surface elevations are approximately 150.00–151.50 m.

Geologically, the site has Quaternary deposits of the following stratigraphic units stretching to a depth of 52.0 m (from top to bottom):

• anthropogenic soils (t-QIV) are found from the ground surface to a depth of approximately 0.5–2.0 m;

• Middle Quaternary alluvial-fluvioglacial deposits of the third terrace above the floodplain (a,f-QIIms) are found at the depths of 0.5–2.0 m, corresponding to absolute elevations of 149.50–151.00 m, and are represented by sands and loams with a total thickness of 10.0–15.0 m;

• Middle Quaternary fluvioglacial and lacustrine-glacial deposits (f,lg-QIIms) underlie the alluvial-fluvioglacial deposits at depths of 12.0–15.5 m, corresponding to absolute elevations of approximately 136.00–138.00 m, and are represented by sands, sandy loams, and loams with a thickness of 1.2–6.0 m;

• Lower Quaternary alluvial-fluvioglacial deposits: Vnukovo series of the Don horizon (a,f-QIVk-ds) are located at the depths of 14.5–17.0 m, corresponding to absolute elevations of 134.50–135.50 m, and are represented by sands, sandy loams, and loams with a thickness of 7.5–12.5 m.

At depths of 34.0–36.0 m below ground surface, corresponding to absolute elevations of 118.00–120.00 m,

the Quaternary deposits rest on bedrock deposits (from top to bottom):

- combined Lower Cretaceous deposits of the Kuntsevo and Lyubertsy members of the Berriasian, the Rostov Formation of the Lower Hauterivian, the Dyakovo Member, and the Savelievskaya and Gremyachevskaya formations of the Upper Hauterivian (K1kn-gr) underlie the Quaternary deposits and are represented by sands up to 2.0 m thick;
- Upper Jurassic–Lower Cretaceous deposits of the Lopatino Formation (J3-K1lp) occur at depths of 32.0–34.0 m, corresponding to absolute elevations of 114.00–116.00 m, and are represented by sands 2.0–4.0 m thick;
- undifferentiated Upper Jurassic deposits of the Filievskaya and Egoryevskaya formations (J3fl+eg) occur at depths of 37.5–39.0 m, corresponding to absolute

elevations of 111.00–113.50 m, and are represented by sands 2.0–4.0 m thick;

- Middle–Upper Jurassic deposits of the Velikodvorskaya–Ermolinskaya formations (J2-3vd-er) occur at depths of 40.0–42.0 m, corresponding to absolute elevations of 108.50–110.50 m, and are represented by clays 15.0–17.0 m thick;
- Middle Jurassic deposits of the Chulkovskaya Formation (J2chl) occur at depths of 57.0–58.0 m, corresponding to absolute elevations of 92.00–93.50 m, and are represented by sandy clays and clayey sands more than 3.0 m thick;
- Upper Carboniferous deposits of the Khamovniki Formation, upper (Neverovskaya) subformation (C3hm2), occur at depths of 57.0–59.5 m, corresponding to absolute elevations of 92.00–93.00 m, and are represented by clays with marl interlayers 1.0–3.0 m thick;

Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils for the Hardening Soil model in the Plaxis software package

EGE number and type	P^{ref}	Overconsolidation ratio OCR	Oedometer deformation modulus E_{oed}^{ref}	Power exponent of stiffness dependence on stress level m	Coefficient of lateral pressure at rest K_0^{nc}	Secant deformation modulus E_{50}^{ref}	Reloading deformation modulus E_{ur}^{ref}	Poisson's ratio ν	Poisson's ratio for reloading ν_{ur}	Dilatancy angle ψ
	kPa	–	MPa	–	–	MPa	MPa	–	–	deg
EGE-2a. Fine sands, loose, moist (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	12.1	0.27	0.31	13.7	72.2	0.32	0.28	8.8
EGE-2b. Fine sands with interlayers of medium sands, medium dense, moist and water-saturated (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	17.1	0.33	0.29	21.6	107.0	0.32	0.25	6.0
EGE-2c. Fine sands with interlayers of medium sands, dense, moist and water-saturated (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	17.9	0.33	0.29	26.2	143.1	0.27	0.23	7.5
EGE-4. Plastic sandy loams, with interlayers of light sandy loams, with interlayers and pockets of medium sands, with grus and crushed stone (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	1.0	6.6	0.31	0.31	6.1	78.4	0.34	0.32	–
EGE-4a. Medium sands with interlayers of coarse sands, locally clayey, with interlayers of loams and sandy loams, with grus and crushed stone, medium dense, water-saturated (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	–	15.5	0.24	0.28	17.8	121.3	0.30	0.27	8.8
EGE-4b. Medium sands with interlayers of coarse sands, locally clayey, with interlayers of loams and sandy loams, with grus and crushed stone, dense, water-saturated (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	–	17.3	0.24	0.30	18.6	128.8	0.27	0.24	9.5

End of the Table 1

EGE number and type	P^{ref}	Overconsolidation ratio OCR	Oedometer deformation modulus E_{oed}^{ref}	Power exponent of stiffness dependence on stress level m	Coefficient of lateral pressure at rest K_0^{nc}	Secant deformation modulus E_{50}^{ref}	Reloading deformation modulus E_{ur}^{ref}	Poisson's ratio ν	Poisson's ratio for reloading ν_{ur}	Dilatancy angle ψ
	kPa	–	MPa	–	–	MPa	MPa	–	–	deg
EGE-5. Plastic sandy loams with interlayers of loams, less commonly clays (a,f– Q_I^{vk-ds})	290	1.9	28.8	0.28	0.65	24.2	157.8	0.30	0.28	–
EGE-7a. Fine sands with interlayers of silty sands, medium dense, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	100	–	12.9	0.32	0.32	18.5	118.9	0.30	0.26	8.6
EGE-7b. Fine sands with interlayers of silty sands, dense, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	100	–	17.2	0.28	0.34	23.7	152.4	0.31	0.24	11.1
EGE-8. Medium sands with interlayers of coarse sands, dense with medium-dense interlayers, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	170	–	29.0	0.39	0.27	35.1	156.4	0.35	0.29	13.1
EGE-10. Semisolid clays, highly sandy, with frequent interlayers (interbedding) of silty and fine sands (J_3 – K_{lp})	440	1.3	17.4	0.37	0.65	20.5	157.7	0.33	0.31	–
EGE-11. Semisolid clays with interlayers of sandy loams and sands, with phosphorite inclusions (J_3fl+eg)	400	1.5	13.2	0.61	0.52	17.3	139.5	0.41	0.34	–
EGE-12. Semisolid clays with hard clay interlayers ($J_{2-3}vd-er$)	590	1.7	27.5	0.55	0.71	20.4	141.0	0.42	0.39	–

Table 2. Summarized results calculations required for selecting the foundation-soil improvement method

Design solution	Characteristics of foundation soil/ foundation	Required settlement, cm	Number of piles within a 10 × 10 m site area	Pile volume within a 10 × 10 m site area at the stratum depth equal to pile length/mass depth, m ³	Predicted settlement, cm
Foundation slab on natural ground	EGE-2b (see Fig. 2)	15	–	–	20.85
Foundation slab on a Jet Grouting-improved soil mass	$E = 261.95$ MPa, mass dimensions: $h = 12.8$ m, $d = 0.6$ m, spacing = 0.9 m		121	1,548.8	9.87
	$E = 224.68$ MPa, mass dimensions: $h = 11.0$ m, $d = 0.6$ m, spacing = 0.9 m			1,331	12.36
DPT piles	$d = 350$ mm, spacing = 1.4 m, length = 15 m		49	735*	19.62
	$d = 350$ mm, spacing = 1.4 m, length = 25 m			1,225*	8.8

Note: * — DPT pile volume calculation disregarded pile enlargements.

- Upper Carboniferous deposits of the Khamovniki Formation, lower (Ratmirovskaya) subformation (C3hm1), occur at depths of 59.0–62.5 m, corresponding to absolute elevations of 89.00–91.00 m, and are represented by limestones more than 4.5 m thick.

The hydrogeological conditions of the site are characterized by the presence of a supra-Jurassic aquifer complex. Groundwater was encountered at depths of 9.0–11.5 m, corresponding to absolute elevations of 140.00–141.00 m. The aquifer is unconfined.

A total of 16 engineering-geological elements (EGEs) were identified at the construction site. The list of EGEs and the recommended physical and mechanical characteristics of soils for the Hardening Soil model in the Plaxis software package are provided in Table 1.

MATERIALS AND METHODS

Two foundation-improvement technologies were considered in this study to reduce the predicted deformations of foundation soils [1–3].

Jet Grouting (jet grouting) is a ground improvement technology based on the energy of a high-pressure cement grout jet [4–6].

Three types of Jet Grouting technology are distinguished [7]:

- Jet 1 (single-fluid). Only a cement jet is used for cutting and mixing. The diameter of soil-cement columns depends on the soil type: 500–600 mm for clayey soils and 700–800 mm for sandy soils;
- Jet 2 (double-fluid). The cement jet is assisted by a compressed-air flow, which increases the energy and pile diameter. It is particularly effective in clayey soils, where greater energy is required for high-quality mixing;
- Jet 3 (triple-fluid). A double jet of water and air is used to cut the soil being improved and remove soil

particles, after which cement grout is supplied through a separate nozzle. This method ensures maximum pile strength and forms large-diameter elements.

Advantages of Jet Grouting [8]:

- predictable results;
- high productivity (up to 300 linear meters of jet piles per day);
- applicability in confined conditions (basements, near existing buildings, and on slopes) [9];
- possibility of installing jet piles beneath existing foundations (piles 300–700 mm in diameter can be constructed through a 100 mm opening);
- possibility of installing jet piles in water-saturated soils.

Ground improvement using discharge-pulse piles (DPT piles), also known as the discharge-pulse technology, is a method for constructing bored injection piles by means of pulsed electric current.

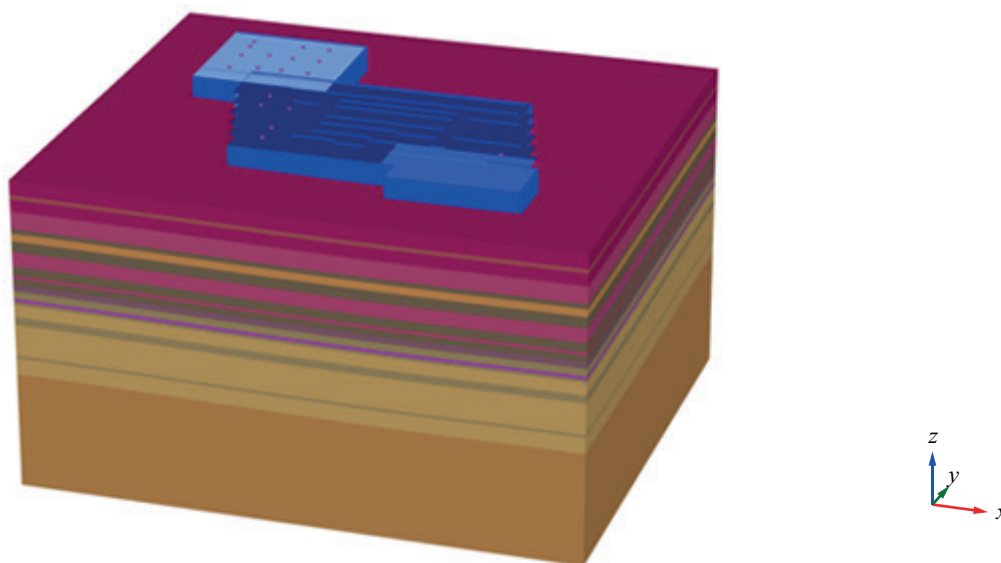
The concrete mix placed in a borehole is subjected to pulsed electric current using a special emitter. High-voltage electric discharges generate electric explosions. Owing to the electrohydraulic effect, the pile body expands locally, including in the toe zone [10–14].

As a result [15]:

- the borehole diameter increases by a factor of two or more;
- the pile is firmly anchored in the ground and can withstand high vertical and horizontal loads;
- the surrounding soil is compacted and cemented, which increases the strength of the structure [16].

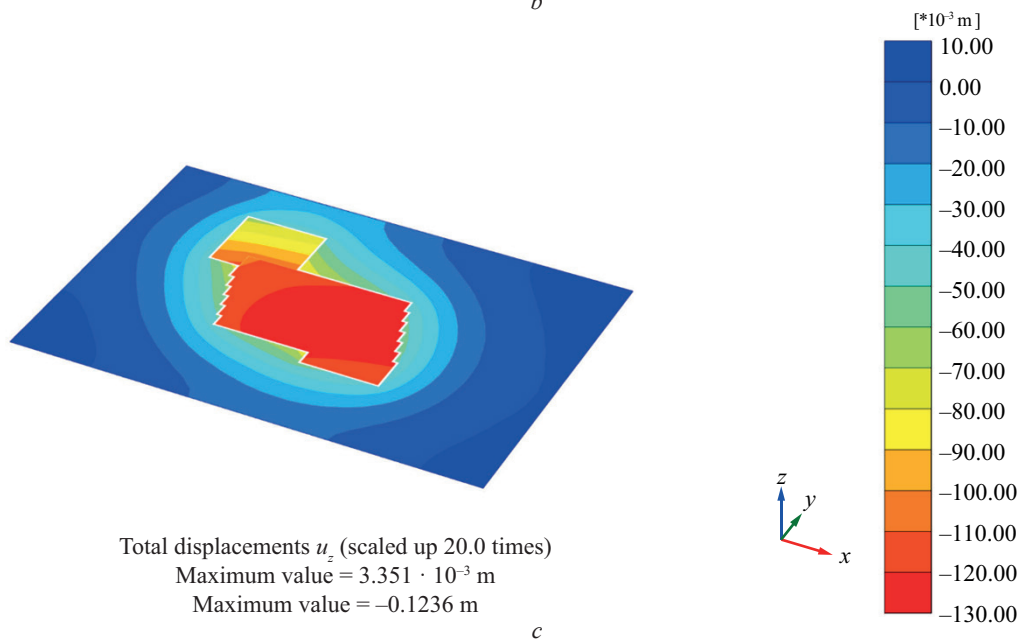
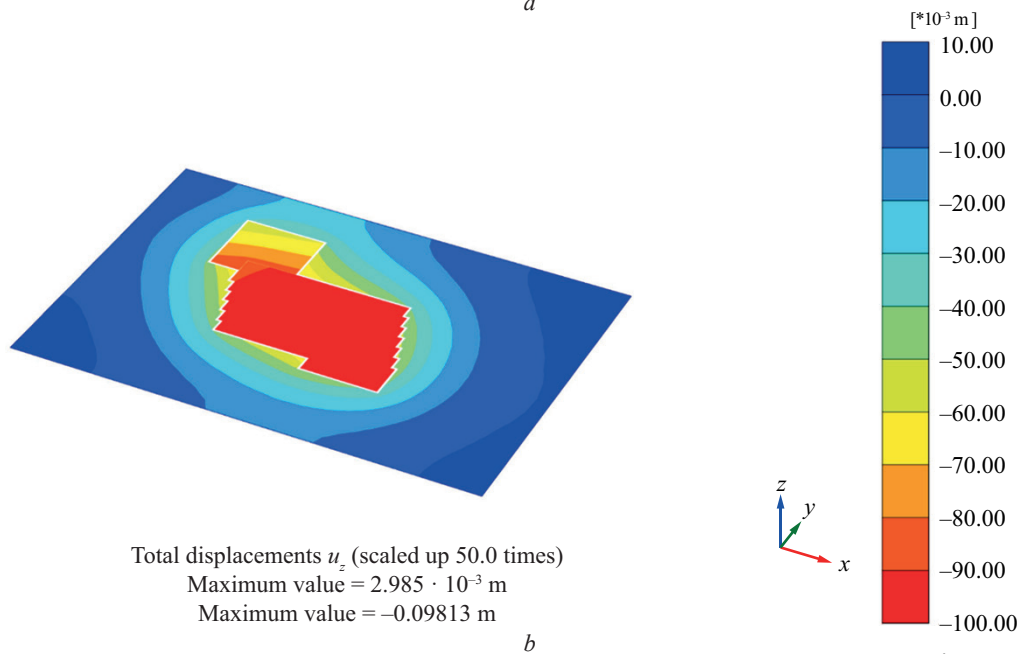
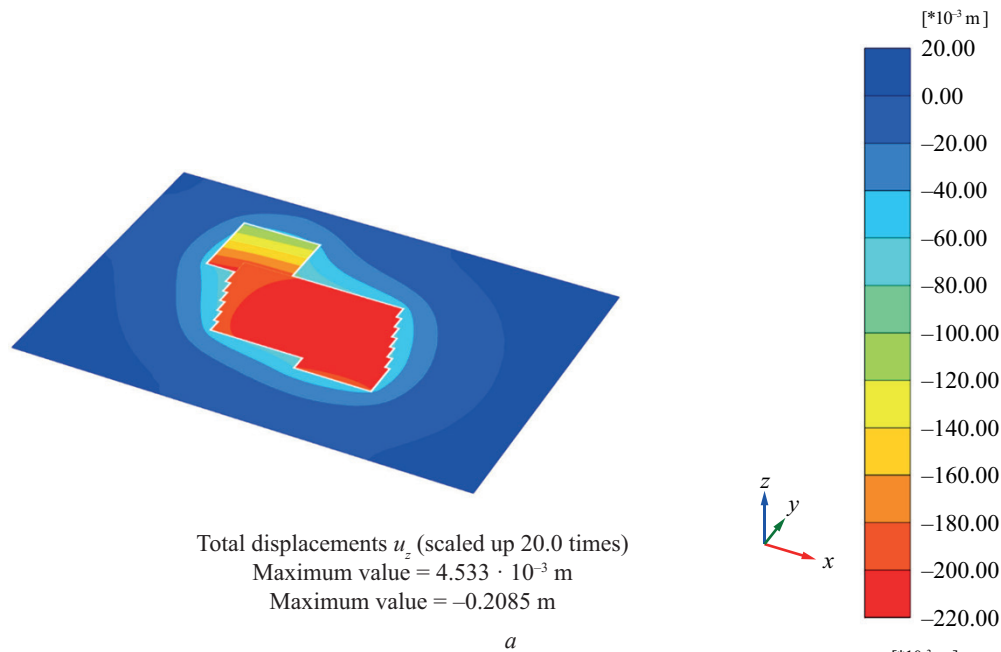
Advantages of DPT:

- work performance in a lower room with a ceiling height of at least 2.4 m (from a basement, semi-basement, or first floor);



Deformed mesh $|u|$ (scaled up 5.00 times)
Maximum value = 0.3967 m (at node 139,672)

Fig. 1. Calculation model



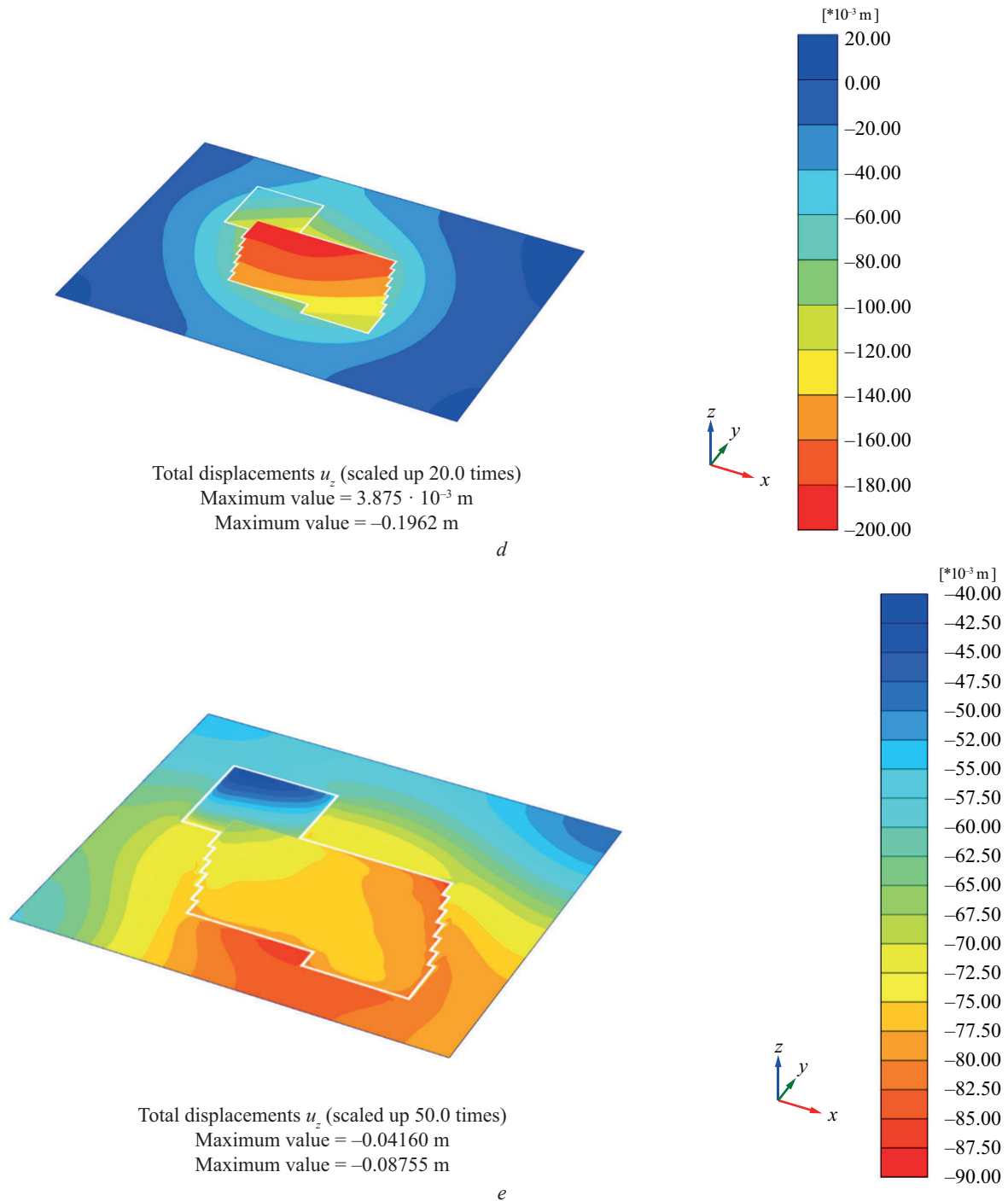


Fig. 2. Vertical displacements: *a* — building on natural ground; *b* — foundation soil improved by Jet Grouting to a depth of 12.8 m; *c* — foundation soil improved by Jet Grouting to a depth of 11.0 m; *d* — foundation soil with DPT piles driven to a depth of 15.0 m; *e* — foundation soil with DPT piles driven to a depth of 25.0 m

- drilling without casing in weak soils when bore-hole walls may collapse;
- the bearing capacity of piles constructed using DPT is up to 2.5 times higher than that of piles constructed using other technologies.

RESEARCH RESULTS

Calculations were made for the following alternative options to select the best foundation:

1. Foundation slab on natural ground.
2. Foundation-soil improvement using Jet Grouting:
 - installation depth of 15.0 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m;
 - installation depth of 12.8 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m;
 - installation depth of 11.0 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m.

3. Construction of DPT pile foundations:
 - pile length of 15.0 m, pile spacing of 1.4 m, pile diameter of 0.35 m;
 - pile length of 25.0 m, pile spacing of 1.4 m, pile diameter of 0.35 m.

The calculation results are presented in Table 2. Settlement values exceeding the allowable value are highlighted in red. Table 2 also presents the number and volume of piles within a 10×10 m site area, with the depth depending on the type of additional measures selected and equal to the depth of the jet-pile mass or the length of the DPT piles.

Based on the assessment of predicted deformations of the designed building, it was established that displacements and relative deformations of the foundation on natural ground exceed the permissible limits [17–20]. Additional measures are required to ensure the integrity and safe operation of the designed building.

Summarized calculation results are provided in Table 2.

The Plaxis 3D calculation results are shown in Fig. 1 and 2.

CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from the study:

1. The use of additional measures at the considered construction site can help minimize predicted deformations during construction of the designed building.
2. The requirements for the second group of limit states can be satisfied using several options of additional measures:
 - construction of a soil-cement mass using Jet Grouting with depths of 11.0 and 12.8 m;
 - construction of a pile foundation using DPT with 350 mm diameter piles that are 25 m long in a 1.4×1.4 m grid.
3. Given the work performance rates for different options, as well as the required pile depths, the optimal solution in the presented case is to use Jet Grouting to improve the foundation soil to a depth of 11.0 m.

REFERENCES

1. Bazarov Zh.V., Filippova E.V. Technologies for soil stabilization via cement grouting. *Effective Building Structures: Theory and Practice : Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference*. 2021; 14-22. EDN RJSURE. (rus.).
2. Shchuklinov S.P., Nefedova V.K. Technology jet-grouting — modern method of construction on soft ground. *St. Petersburg School of Flow-Based Construction Organization : 1st All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of the Birth of Professor Viktor Alekseevich Afanasyev*. 2018; 88-92. EDN XWNMCD. (rus.).
3. Znamensky V.V., Chunyuk D.Yu., Morozov E.B. Construction of excavation retaining systems in constrained urban conditions. *Housing Construction*. 2012; 9:60-62. EDN NSDYTB. (rus.).
4. Shashkin A.G., Bogov S.G. Use of Jet Grouting technology for the construction of an underground space in weak clayey soils. *Housing Construction*. 2014; 9: 27-33. EDN SMVCNX. (rus.).
5. Moiseeva Y.A., Tokareva Y.A., Kaloshina S.V. Comparative characteristics of Jet Grouting systems Jet-1, Jet-2, Jet-3. *Modern Technologies in Construction: Theory and Practice*. 2018; 1:425-430. EDN XQZULB. (rus.).
6. Prokopenko D.V., Byhovtsev V.E., Kirgintseva S.V. Analytical method for determining the bearing capacity of the pile-rit in subgrade. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2014; 6(87):129-132. EDN TDOVON. (rus.).
7. Ter-Martirosyan Z.G., Eremin V.Ya., Budanov A.A. Justification of the calculation method for the bearing capacity of soil beneath the base of RIT-type friction piles. *Achievements, Problems, and Promising Directions in the Development of the Theory and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering : Proceedings of Academic Readings on Geotechnics and the International Meeting of Department Heads*. 2006; 122. (rus.).
8. Kubetskiy V.L., Eremin V.I. Application of rit piles in foundations of high-rise buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 4:240-245. EDN PABGXJ. (rus.).
9. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Method of control and forecasting parameters and strength of jet-piles at the production of works. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017; 2(13):41-50. EDN YLGAMV. (rus.).
10. Lomov P.O., Lanis A.L., Razuvaev D.A., Kavardakov M.G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021; 13(5):357-365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040. EDN DKSADH.
11. Chunyuk D.Yu. Qualitative analysis of components the geotechnical risk in underground construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2010; 4-4:136-143. EDN RTSDWZ. (rus.).
12. Bogdanov A.S. Advantages of the geotechnical technology of jet grouting. *Fundamental Science and Technology : Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2020; 221-233. EDN UVAIBS. (rus.).
13. Bondar S.P., Chigarev A.G. Jet-Grouting technology: an effective solution for foundations on weak soils. *Scientific MEGAFEST 2025 : Collection of articles from*

the International Research Competition. 2025; 13-17. EDN PEHHJT. (rus.).

14. Bykhoutsev V.E., Prokopenko D.V., Curganova L.A. Calculation of piles-cit on the first limiting condition. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 2015; 3(24):90-93. EDN UNFMDL. (rus.).

15. Galavetdinov V.Z., Davydenko B.Y., Eremin V.V. Effectiveness of discharge — pulse technology in complex geological conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015; 3:181-186. EDN TJYGAV. (rus.).

16. Triantafyllidis Th., Schäfer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations. *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2007; 2:683-688.

17. Galimnurova O.V., Galimnurov I.R., Samofeev N.S. To the efficiency of use discharge-pulse technology piles in the reconstruction of buildings and structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(2):62. EDN TCESOD. (rus.).

18. Chuniuk M.S. The use of jet-grouting technology in new construction, as an alternative to traditional pile foundations. *Construction Economics*. 2023; 4:264-266. EDN ZXOJXX. (rus.).

19. Gryaznova E.M., Gavrilo A.N., Chuniuk D.Yu., Borchev K.S. *Geotechnical monitoring in construction : textbook*. Moscow, 2016; 80. EDN ZGASEV. (rus.).

20. Abbott K.W., Levi-Faur D., Snidal D. Theorizing regulatory intermediaries: The RIT model. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*. 2017; 670(1):14-35. DOI: 10.1177/0002716216688272

Received December 21, 2025.

Adopted in revised form on February 5, 2026.

Approved for publication on March 2, 2026.

BIONOTES: **Serafima M. Selviyan** — Senior Lecturer at the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1104084, Scopus: 57209301023, ORCID: 0000-0003-0288-0550; SelviyanSM@mgsu.ru;

Ulyana O. Moskovkina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; moskovkina.u@mail.ru;

Ekaterina A. Sofronova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; soka280204@gmail.com;

Daria D. Antropova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; antrdari@yandex.ru.

Contributions of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors claim no conflict of interest.

Информационное обеспечение мониторинга строительства с использованием современных технологий

Ирина Михайловна Сутугина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассмотрено информационное обеспечение мониторинга строительства с использованием современных технологий, а именно применение аэро- и космических снимков для мониторинга строительства. Тема актуальна в связи с расширением возможностей применения цифровых технологий в строительстве, к которым относится цифровая фотограмметрическая обработка аэро- и космических снимков. Проанализировано отображение строительной площадки на таких снимках: строительная техника, стадии строительства, строительные материалы.

Материалы и методы. Для проведения анализа отображения на цифровых снимках объектов строительства, строительной техники и строительных материалов использованы материалы, полученные из ЯндексКарт на территорию г. Москвы, в которые на момент подготовки статьи были загружены фрагменты космических снимков и материалы аэрофотосъемки, соединенные в единое покрытие территории. При выполнении исследования для получения научных результатов применялись общенаучные методы познания: абстрагирование, анализ, синтез, группировка, аналогия, индукция, дедукция, моделирование; историко-логический, сравнительный, системный подходы. Приемы сбора, обработки и анализа информации определялись конкретными целями исследования.

Результаты. Представлен результат анализа отображения объектов на космических и аэроснимках, проанализированы геометрические размеры таких объектов и вытекающее из этого требуемое разрешение съемок.

Выводы. На основе рассмотренного материала можно сделать вывод, что для мониторинга строительства оптимально применение аэросъемки с самолета и беспилотного летательного аппарата, также возможно использование космической съемки сверхвысокого разрешения. Приведенные примеры показали, какие из интересующих объектов будут различимы на снимках, а значит, это даст возможность их дешифрирования и определения местоположения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэро- и космические снимки, мониторинг, строительная площадка, строительная техника, строительные материалы, стадии строительства, параметры съемки, разрешение на местности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сутугина И.М. Информационное обеспечение мониторинга строительства с использованием современных технологий // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.3

Автор, ответственный за переписку: Ирина Михайловна Сутугина, SutuginalM@mgsu.ru.

Information support for monitoring construction using modern technologies

Irina M. Sutugina

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

ABSTRACT

Introduction. The article considers information support for monitoring construction using modern technologies, namely the use of aerial and satellite images for monitoring construction. This topic is of particular relevance given the expanding scope of digital technologies in the construction industry, including digital photogrammetric processing of aerial and satellite imagery. The representation of the construction site in such images has been analyzed: construction machinery, stages of construction, and building materials.

Materials and methods. To analyze the representation of construction sites, construction machinery and building materials in digital images, data obtained from Yandex Maps covering the city of Moscow was used; at the time of writing, this data included sections of satellite imagery and aerial photographs, which had been combined to form a single map covering the area. In conducting the research to obtain scientific results, general scientific methods of inquiry were applied: abstraction, analysis, synthesis, grouping, analogy, induction, deduction and modelling; as well as historical-logical, comparative and systems approaches. The methods of collecting, processing and analyzing information were determined by the specific objectives of the research.

Results. The results of an analysis of how objects appear in satellite and aerial photographs are presented; the geometric dimensions of such objects are analyzed, along with the resulting required resolution for the imagery.

Conclusions. Based on the material reviewed, it can be concluded that the optimal method for monitoring construction is the use of aerial photography from aeroplanes and unmanned aerial vehicles; the use of ultra-high-resolution satellite imagery is also a possibility. The examples given have shown which of the objects of interest will be distinguishable in the images, and this will therefore make it possible to interpret them and determine their location.

KEYWORDS: aerial and satellite images, monitoring, construction site, construction machinery, building materials, construction stages, survey parameters, terrain resolution

FOR CITATION: Sutugina I.M. Information support for monitoring construction using modern technologies. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.3

Corresponding author: Irina M. Sutugina, SutuginalM@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Аэро- и космические снимки могут применяться для мониторинга строительства с помощью цифровой фотограмметрической обработки. Тема может быть отнесена к разделу информационного обеспечения инженерных изысканий и строительства. Актуальность определяется тем, что еще не все возможности внедрения цифровых технологий, использования дистанционных методов зондирования и искусственного интеллекта реализованы в сфере строительства. Снимки являются не только растровой подложкой для векторных карт, а источником данных, нацеленным на пространственный анализ и построение моделей принятия управленческих решений.

Применение материалов аэрокосмических съемок позволяет дистанционно получить качественную и достоверную пространственную информацию.

Действующими ГОСТами^{1, 2} регулируются вопросы выполнения аэрофотосъемки и применения беспилотных авиационных систем (БАС) для производства геодезических работ и изысканий в строительстве.

ГОСТ Р 59328–2021 «Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования» регулирует цифровую аэрофотосъемку, которая выполняется для создания и обновления топографических карт и планов, получения других пространственных данных. Стандарт устанавливает требования к комплексу работ по цифровой аэрофотосъемке, включая качество, оформление и сдачу получаемых материалов. ГОСТ распространяется на исполнителей и заказчиков цифровой аэрофотосъемки, проводимой в целях топографического картографирования, обеспечения кадастровых работ и используется при приемке материалов аэрофотосъемки. Он содержит требования к аэрофотокамерам (например, наличие центрального затвора, постоянство значений элементов внутреннего ориентирования), а также параметрам съемки: включает приложения с номинальными значениями проектируемых перекрытий аэрофотоснимков, допу-

сками отклонений при оценке фотограмметрического качества материалов и др. Цель стандарта — техническое регулирование технологических процессов проектирования и осуществления топографической аэрофотосъемки, установление требований к оборудованию, качеству получаемых материалов, их комплектности и оформлению.

Стандарт разработан ФГУП «СТАНДАРТИН-ФОРМ», ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» и ООО «Геоскан» при участии технического комитета по стандартизации ТК 404 «Геодезия и картография».

Стандарт разработан АО «Научно-исследовательский центр «Строительство»» совместно с НИИЖБ им. А.А. Гвоздева при участии более 30 профильных организаций в рамках технического комитета по стандартизации ТК 465 «Строительство». Стандарт введен в действие 1 февраля 2026 г. с правом досрочного применения.

Классические подходы к фотограмметрической обработке аэро- и космических снимков и применение материалов съемки в различных отраслях экономики описаны российскими авторами Н.Д. Ильинским, А.Н. Лобановым, Б.К. Малявским, А.И. Обираловым, А.А. Фостиковым [1–3].

В зарубежных изданиях приведены материалы по получению и цифровой обработке материалов дистанционного зондирования (авторы J. Albertz [4], H. Ziemann [5]).

Из числа авторитетных источников литературы необходимо отметить книги и статьи таких авторов, как А.Г. Чибуничев [6] и С.А. Кадничанский с соавт. [7–10].

В книге А.Г. Чибуничева «Фотограмметрия: учебник для вузов» [6] представлены действующие на сегодняшний день подходы к теории и практике получения и обработки снимков в современном и одновременно классическом изложении. Рассмотрены вопросы проективной фотограмметрии и автоматизации фотограмметрических измерений, выполняемых по цифровым изображениям, создания цифровых моделей поверхности рельефа, местности и ортофотопланов, воздушное и наземное лазерное сканирование, фотограмметрические методы обработки изображений, полученных сканерными съемочными системами, технология аэрофототопографической съемки, а также вопросы наземной фотограмметрии [6].

¹ ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. 2021.

² ГОСТ Р 71886–2024. Системы беспилотные авиационные в строительстве, применяемые для производства геодезических работ. 2025.

В монографии С.А. Кадничанского «Аэрофотограмметрия и аэрофототопография» [7] исследуются подходы к цифровой фотограмметрической обработке с позиций точности и детальности изображений, приведены сведения о современных съемочных системах и оценке точности результатов измерений, выполняемых по таким снимкам, и алгоритмы решения некоторых задач. Также [7] рассмотрена теория обработки снимков, особенности, свойства и характеристики цифровых аэрофотоснимков. Указаны методы и технологические процессы аэрофототопографической съемки, включая работы по составлению оригинала топографической карты и плана. Представленные в труде [7] результаты различных экспериментальных работ можно использовать для планирования и оптимизации технологий получения информации по аэрофотоснимкам, выбора параметров обработки информации и оборудования.

По теме мониторинга строительства опубликован ряд работ^{3, 4, 5}. Материалы и исследования, приведенные в презентации АО «ТерраТех», использованы при реализации модуля «Строй-Контроль» платформы «Цифровая Земля» Роскосмоса.

Вопросам применения аэро- и космических снимков и искусственного интеллекта в строительстве посвящены исследования Б.С. Садовского и И.М. Сутугиной [11, 12], а также М.М. Зиброва [13, 14].

С.А. Арбузовым разработана методика применения ярких, пространственных и геометрических признаков в комплексе для автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков, что дает возможность повысить точность определения изменений на застроенных территориях, в том числе установление высот зданий, а также мониторинг хода строительства [13].

Использование данных космической съемки сверхвысокого разрешения для решения задач территориального зонирования рассмотрено в работе О.Ф. Торсуновой [15].

В статьях М.А. Щеглова, А.И. Карелова, А.А. Майорова, А.А. Павловского представлены методы применения ГИС-технологий при контроле строительства

с использованием данных аэро- и космических съемок и мониторинг объектов строительства железнодорожной инфраструктуры с помощью информации с БАС [16, 17].

М.А. Плотникова и Е.П. Хлебникова изучают вопросы выявления изменений на территории городского пространства, связанных со строительством новых объектов, реновацией и реконструкцией, с помощью данных дистанционного зондирования. В работе проведен анализ алгоритмов автоматизированного выявления изменений по разновременным космическим снимкам в программе ERDAS IMAGINE 2010. Определены факторы, которые необходимо учитывать при мониторинге городских территорий [18].

Вопросам обработки аэро- и космических снимков для решения градостроительных задач (классификации фотограмметрических облаков точек, полученных по стереопарам космических снимков) в программном комплексе Photomod посвящена статья Р.В. Пермякова [19].

В целом, проанализировав имеющуюся информацию, можно сделать вывод, что тема мониторинга строительства по аэро- и космическим снимкам актуальна, есть ряд работ, в которых проведен анализ возможностей применения аэро- и космических снимков в строительной сфере, но можно также сделать вывод, что еще не все аспекты этого вопроса изучены, требуются дополнительные исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью анализа отображения на цифровых снимках объектов строительства, строительной техники и строительных материалов применены материалы, полученные из поисково-информационной картографической службы Яндекса ЯндексКарты. Использованы материалы для г. Москвы: фрагменты космических снимков и информация аэрофотосъемки, соединенные в единое покрытие территории. Для анализа выполнен поиск фрагментов покрытия на территории строительных площадок, расположенных в г. Москве. Также проанализирована работа⁶, содержащая примеры аэро- и космических снимков, полученных различными съемочными системами, применяющимися в Германии.

При проведении исследования для получения научных результатов применялись общенаучные методы познания: абстрагирование, анализ, синтез, группировка, аналогия, индукция, дедукция; моделирование, историко-логический, сравнительный, системный подход. Приемы сбора, обработки и анализа информации определялись конкретными целями исследования.

⁶ Flying Camera. Learning from the Bird's Eye View Geography in Aerial and Satellite Pictures // Doersdorf Germany. 2026. P. 25.

³ Вместо геодезиста и охранника: как беспилотники используются в строительстве // Геоскан. 2022. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/blog/vmesto-geodezista-i-okhrannika-kak-bpla-ispolzuyutsya-v-stroitelstve?ysclid=mm2xi4xy4d319006035>

⁴ Презентация АО «ТерраТех». Космический мониторинг строительных работ. 2026. URL: <https://terratech.ru/solutions/construction/?ysclid=mm3gx2272u4091267>

⁵ Изучение возможностей использования спутниковых снимков и данных дронов для контроля за ходом строительных работ. 2025. URL: https://gisproxima.ru/izuchenie_vozmozhnostey?ysclid=mm2xr82yv899424591

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день для осуществления мониторинга строительства доступны данные ряда российских и зарубежных спутников. Также в 2025 г. Россия запустила 28 спутников различного назначения. Согласно статье Р. Пермякова «Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ и тенденции отрасли в 2025 году»: «на 2026 г. перенеслись планы Роскосмоса по запуску гидрометеорологического аппарата на высокой орбите Электро-Л № 5. Среди частных компаний в 2026 г. ГК «Спутникс» планирует вывести на орбиту аппарат Киноспутник с разрешением 0,8 м/пикс, а консорциум ООО «МТ-ЛАБ» и «Стилсофт» — аппарат КОЭН с разрешением 0,5 м/пикс. Кроме того, ожидается, что в 2026 г. на закупку данных ДЗЗ у частных и государственных спутниковых

компаний выделено для государственных заказчиков 5 млрд рублей из федерального фонда»⁷.

Для мониторинга строительства хорошо подходят по разрешающей способности и информативности космические снимки от аппаратов «Ресурс-П», обеспечивающих высокодетальную съемку местности, также данные аппаратов высокого разрешения «Канопус-В», «Аист-2Т» для стереосъемки и получения цифровых карт местности.

На рис. 1–4 приведены примеры фрагментов космических снимков (оптическая съемка) со спут-

⁷ Пермяков Р.В. Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ и тенденции отрасли в 2025 году. 2025. URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/obshchie-voprosy/itogi-zapuskov-kosmicheskikh-apparatov-dzz-i-tendentsii-otrasli-v-2025-godu-/?ysclid=mm3fb0tg1a745825371>

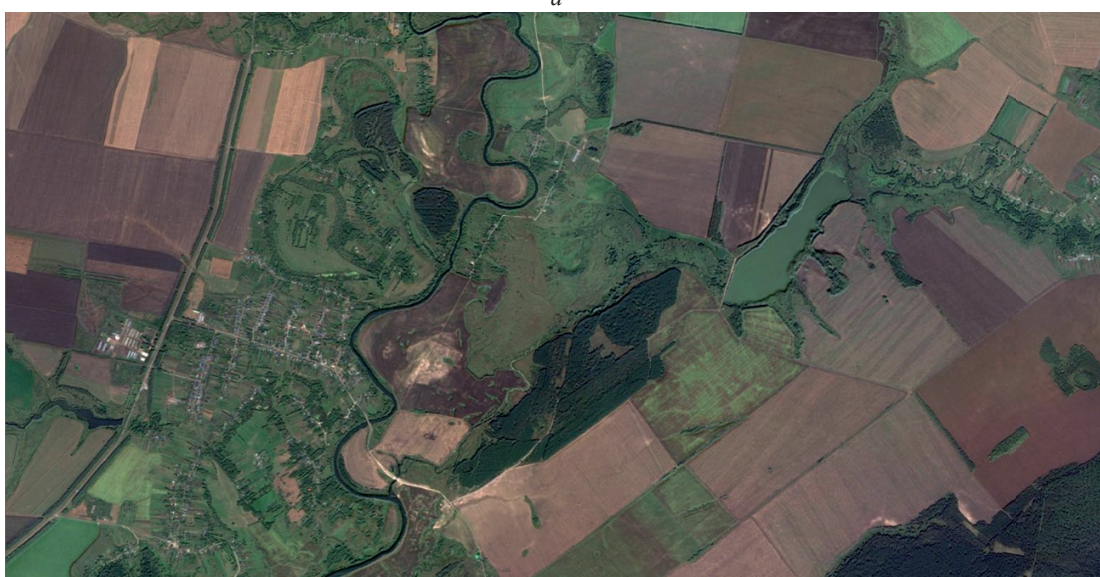
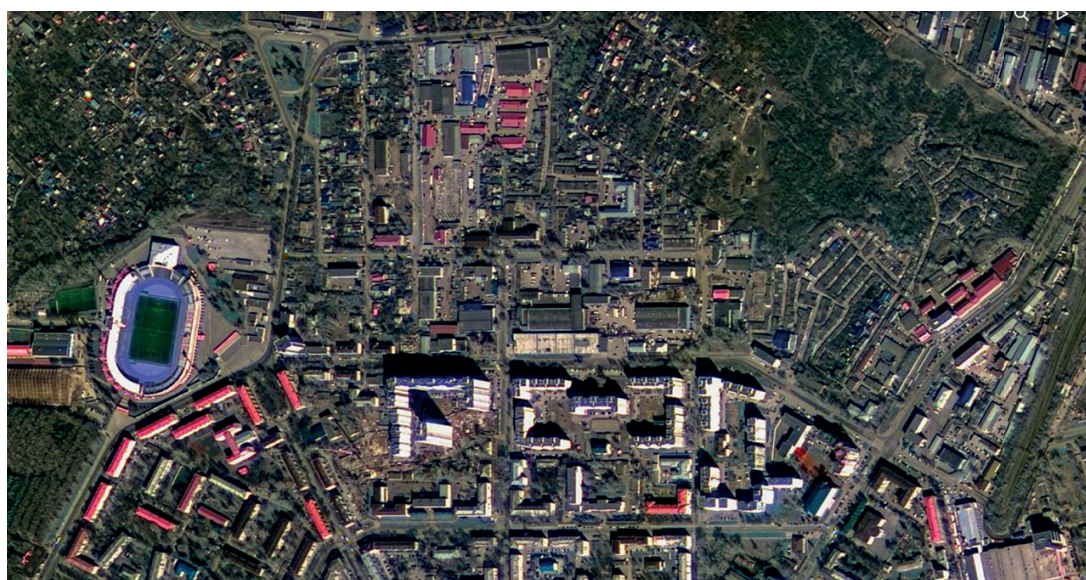


Рис. 1. Фрагмент космического снимка со спутника: *a* — Ресурс-П (российский государственный спутник), пространственное разрешение — 0,7 м; ширина кадра — 38 км; *b* — Канопус-В, разрешение на местности — 2,5 м

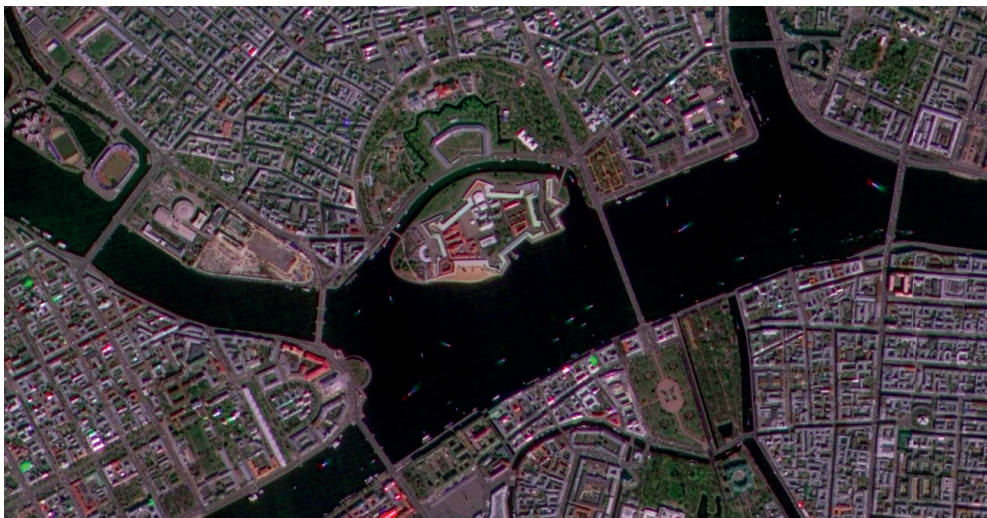


Рис. 2. Группировка российских государственных спутников Канопус-В с пространственным разрешением 2,5 м на пиксел



Рис. 3. Коммерческий российский спутник СТИЛСАТ с пространственным разрешением 0,5 м на пиксел. Оператор спутника — частная космическая компания СТИЛСПЭЙС

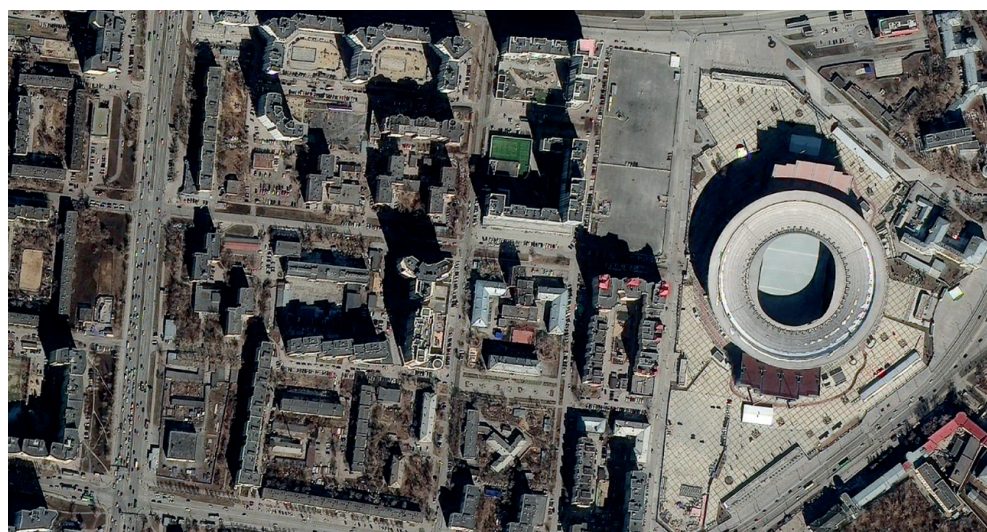


Рис. 4. Фрагмент китайского космического снимка Jilin-1 (EarthScanner) с разрешением на местности 0,5 м на пиксел, ширина кадра — 150 км

ников, доступных для заказа на сайте АО «ТерраТех» российских космических систем⁸.

Для получения автоматической экспертной аналитики о строительных площадках по конкретным объектам можно использовать облачный сервис «Цифровая Земля» модуль «Строй-контроль». В рамках этого сервиса доступно получение информации о состоянии конкретных объектов, заданных по координатам; аналитика, полученная на основе данных космических съемок и съемок с воздуха. Точность геопривязки материалов составляет 10 м.

Мониторинг строительства можно проводить и в организациях на основе информации дистанционного зондирования без использования сервиса, применяя специальное оборудование, программное обеспечение и сведения съемок.

⁸ Оптическая съемка. URL: <https://terratech.ru/data/optika/>

Космический мониторинг строительных работ может включать в себя следующие виды работ: определение стадий строительства, идентификацию работающей на строительной площадке техники; мониторинг карьеров; контроль объемов земляных работ, озеленения территории, хода строительства; мониторинг активности работ.

Нарис. 5–9 приведены примеры отображения выше-названных процессов на материалах, полученных из ЯндексКарт вкладки «Спутник». На ЯндексКартах была отметка, что материалы получены в 2024 г. из результатов аэрофотосъемки на территорию г. Москвы.

Как инструмент для мониторинга строительства ЯндексКарты не может быть использован в связи с тем, что нет возможности получить информацию о дате проведения съемок, точных параметрах съемки, а также нет материалов с определенным временным интервалом для мониторинга хода строитель-

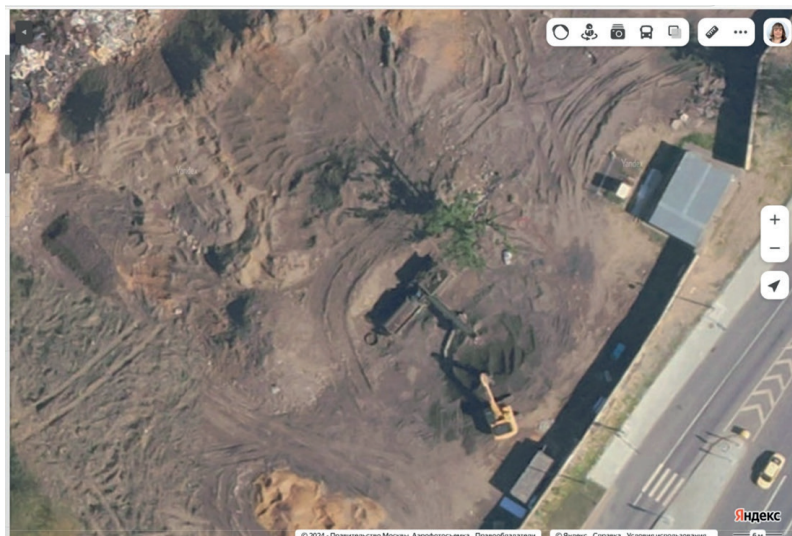


Рис. 5. Буровые и земляные работы



Рис. 6. Сваи



Рис. 7. Возведение этажей



Рис. 8. Внутренняя и внешняя отделка, благоустройство территории

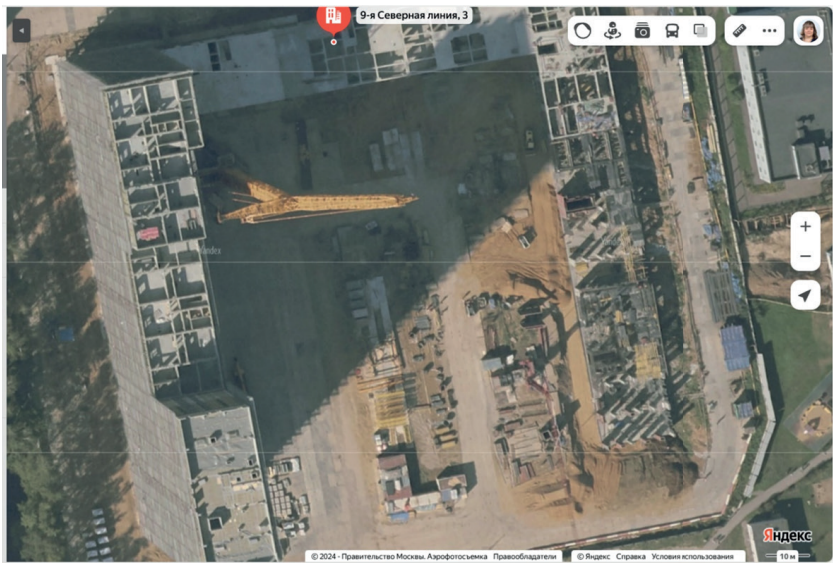


Рис. 9. Определение работающей техники — кран

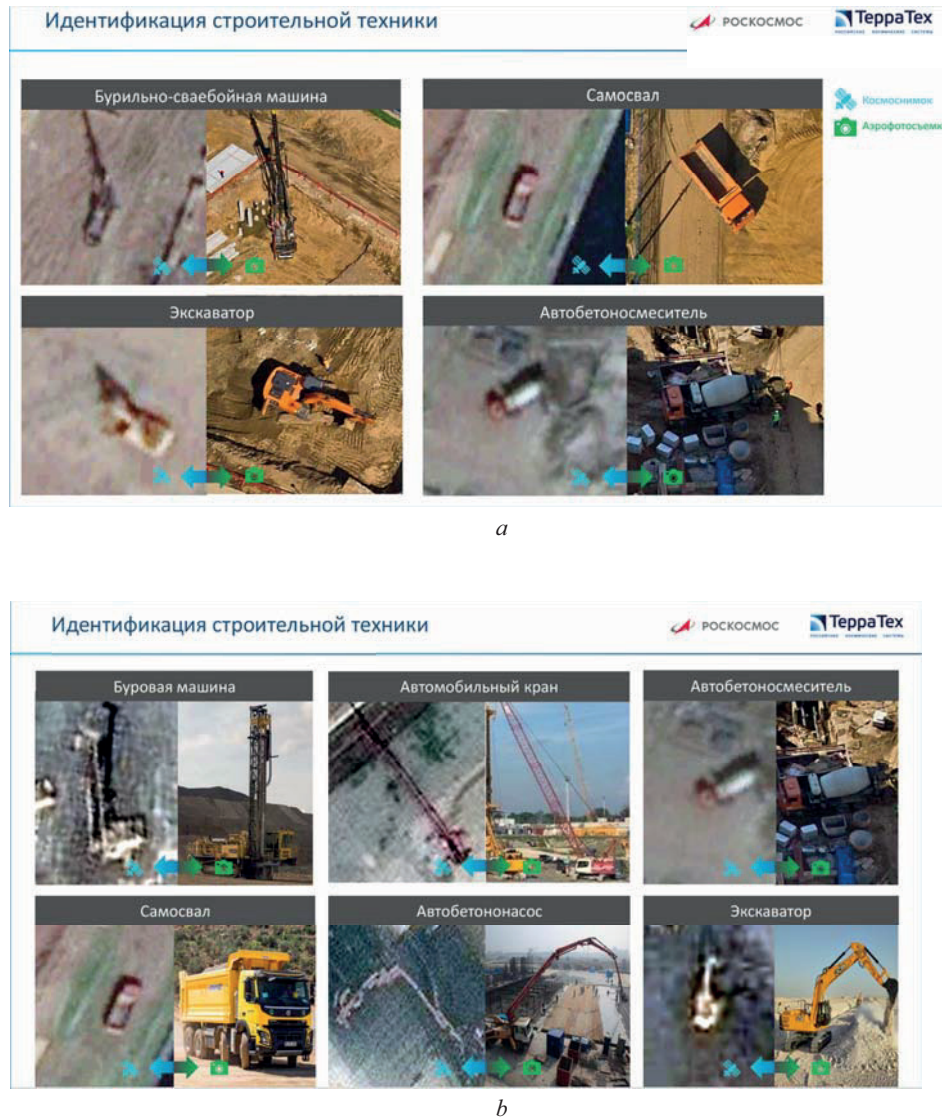


Рис. 10. Идентификация строительной техники на космических и аэроснимках (а); идентификация строительной техники на космических снимках в сравнении с наземной съемкой (б)

ства. Но для решения некоторых исследовательских задач инструмент подходит.

На рис. 10, 11 можно сравнить отображение строительной техники на снимках из космоса и полученных по материалам аэрофотосъемки⁴.

Оценивая представленные на рис. 10 изображения техники, можно сказать, что точно определить модель техники возможно по аэрофотоснимкам благодаря высокой разрешающей способности таких снимков. По космическим снимкам это сделать сложнее, при этом доступно установление факта присутствия машин определенного вида на строительной площадке.

Также актуальным является определение и контроль по аэро- и космическим снимкам строительных материалов на объекте (рис. 11 по материалам Терра-Тех Роскосмоса).

Применение тех или иных видов снимков для мониторинга строительства будет зависеть в большей

степени от требований к отображению мелких деталей на снимках, чем от требований к геометрической точности.

В книге С.А. Кадничанского «Аэрофотограмметрия и аэрофототопография» приведены сведения о техническом обеспечении аэрофотосъемки, методах и технологических процессах съемки, характеристики аэросъемочных камер, подходы к оценке точности материалов и разрешающей способности снимков, в том числе сведения, которые представлены в табл. 1: рекомендованные значения размера пикселя на местности для различных вариантов масштабов плана или карты [7].

Также на выбор параметров съемки будет влиять реальный размер объектов, которые мы планируем определять (идентифицировать и дешифровать) по снимкам, на местности.

В табл. 2 приведены варианты объектов, приведенные на рис. 5–11, б, ориентировочно указаны

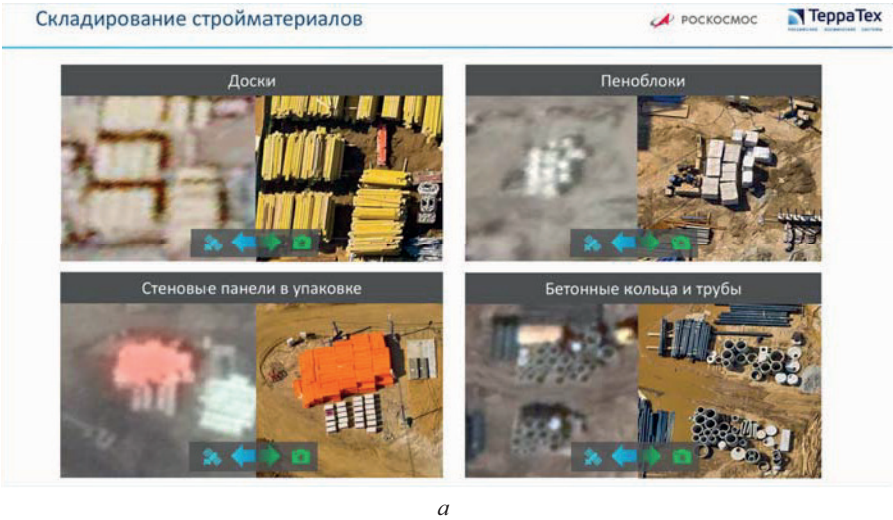


Рис. 11. Складирование стройматериалов: *a* — доски, пеноблоки, стеновые панели в упаковке и бетонные кольца и трубы; *b* — арматура, бетонные кольца, бетонные блоки, гидроизоляция

Табл. 1. Рекомендуемое номинальное пространственное разрешение аэрофотоснимков для построения топографического плана или карты

Масштаб топографического плана или карты	Рекомендуемый размер пикселя на местности (не более), см
1:500	6
1:1000	9
1:2000	20 (14 для территории городских населенных пунктов с многоэтажной и плотной застройкой)
1:5000	30
1:10 000	50
1:25 000	70

минимальные размеры объектов или элементов объектов, которые должны отображаться на снимках. Для этих вариантов показаны некоторые подходящие по параметрам снимки.

Дополнительно следует отметить, что тонкие протяженные объекты (например, арматура, доски, электропровода) будут раздельно различимы и лучше распознаваться на снимках, чем компактные объек-

Табл. 2. Варианты размеров объектов строительной площадки на местности

Объекты	Размер объектов и их элементов на местности (или ширина размытости границы объекта на местности), м	Снимки, на которых они будут отображаться раздельно
<i>Стадии строительства</i>		
Буровые и земляные работы (элементы рельефа, техника)	Техника (очертания, форма) — 1,00 м 0,50 м 0,30 м 0,10 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,30–0,50 м
Железобетонные сваи	0,20–3,00 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,30–0,50 м
Возведение этажей (стены), внутренняя и внешняя отделка	Для наружных стен в умеренных широтах стандартная толщина — 0,51 м (в 2 кирпича). В северных регионах — 0,64 м (в 2,5 кирпича). Для внутренних стен используется кладка толщиной от 0,25 до 0,38 м. Для межкомнатных, межквартирных и офисных стационарных перегородок — не меньше 0,12 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,30 м
<i>Строительная техника</i>		
Буровая машина, самосвал, кран, экскаватор (элементы техники, например колеса, фары, крылья)	0,10 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности
<i>Строительные материалы</i>		
Доски	Толщина 0,013–0,016 м — для обшивки; 0,020–0,025 м — для полов, перегородок; 0,040–0,050 м — для несущих конструкций, опалубки; до 0,075 мм — для особо нагруженных элементов	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности
Пеноблоки	Габариты 0,60 × 0,30 × 0,20 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,30 м
Арматура (прутковая)	Диаметр от 0,01 м и более	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности
Бетонные кольца	Диаметр от 0,70 до 2,50 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,30 м
Гидроизоляция (например, рулонные материалы, гидроизол)	Ширина — 1,00 м. Длина — 8,00, 10,00 или 15,00 м	Аэросъемка с разрешением 0,06–0,10 м на местности. Космическая съемка с разрешением 0,50 м

ты, например блоки при прочих равных по разрешению условиям.

Выбор параметров аэрофотосъемки может быть представлен следующей последовательностью действий, описанной в статье [11]:

«... 1. Рассчитывается максимальная допустимая высота фотографирования: $H_{\max} = \frac{p\delta h}{\delta(\Delta p)}$, где $H_{\max}$ — высота фотографирования; — среднее значение продольных параллаксов точек стереопары; δh — допустимая ошибка определения высот; $\delta(\Delta p)$ — ошибка определения разности продольных параллаксов.

2. Рассчитывается знаменатель масштаба съемки:

$m \leq \frac{\delta_{\text{пл}}}{\delta_{\text{сн}}} M$, где m — знаменатель масштаба снимка; $\delta_{\text{пл}}$ — допустимая погрешность определения положения точки на плане; $\delta_{\text{сн}}$ — погрешность измерения точки на снимке; M — знаменатель масштаба плана.

3. Корректируются вычисленные параметры с учетом требований к итоговой точности конкретной задачи в сфере строительства.

4. Вычисляется фокусное расстояние по формуле: $f = H/m$, где f — фокусное расстояние камеры».

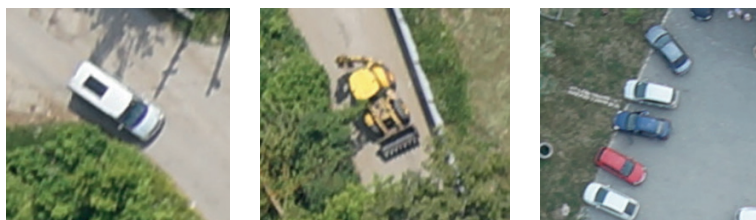


Рис. 12. Примеры увеличенных фрагментов цифровых аэроснимков, полученных с беспилотного летательного аппарата, с отображенной на них техникой

Необходимо отметить, что существуют и другие возможные методики выбора параметров съемки.

Использование съемки с небольшой высоты для мониторинга строительных площадок становится все более актуальным. Применение такой аэросъемки позволяет получать высококачественные снимки земельных участков, отслеживать ход работ и оценивать прогресс в режиме реального времени.

Далее приведены данные по расчету разрешения на местности для съемки, полученной камерой SonyDSC-RX1R с БПЛА. На этих снимках достаточно четко отображалась строительная техника, границы земельных участков, здания, строительные материалы.

Рассчитаем масштаб аэроснимка (так как он будет на матрице цифрового фотоаппарата): формат (размеры) снимка для данной камеры составит 6000 pñx (36,0000 мм) на 4000 pñx (24,0000 мм).

Вычислим физический размер пикселя для каждой из сторон кадра снимка:

- $36 \text{ мм}/6000 \text{ pñx} = 0,006 \text{ мм} = 6 \text{ мкм}$;
- $24 \text{ мм}/4000 \text{ pñx} = 0,006 \text{ мм} = 6 \text{ мкм}$.

Знаменатель масштаба снимка определим по формуле: $1/m = f/H$.

- $m = 12\,687$;
- $f = 34 \text{ мм}$ — фокусное расстояние камеры;
- $H = 12\,683 \cdot 0,0340925 = 432,53 \text{ м}$ — высота съемки.

Разрешение на местности (размер минимального объекта, который будет отображаться на снимке) составит $pñx = 0,006 \text{ мм}$ — на снимке; $0,006 \text{ мм}$ на снимке составит на местности $0,006 \cdot 12\,687 = 76,122 \text{ мм}$.

Размер пикселя или разрешение на местности будет соответствовать $pñx = 7,6 \text{ см}$.

На рис. 12 приведены примеры изображения техники для описанного выше материала съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе рассмотренного выше материала и табл. 2 можно сделать вывод, что для мониторинга строительства оптимально применение аэросъемки с разрешением на местности от 0,06 до 0,10 м, также возможно применение космической съемки сверхвысокого разрешения от 0,30 м. Приведенные примеры показали, какие объекты будут различимы на снимках.

Использование аэросъемки для мониторинга строительных площадок более удобный вариант, потому что позволит проводить необходимое количество съемок с заданными интервалами времени с применением более простого съемочного оборудования, чем для аэрофотосъемки профессиональными аэрофотосъемочными камерами [8].

Планируется дальнейшая работа по данной теме с учетом полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильинский Н.Д., Обиралов А.И., Фостиков А.А. Фотограмметрия и дешифрирование снимков : учебник. М. : Недра, 1986. 375 с.
2. Малявский Б.К., Жарновский А.А. Аналитическая обработка фотограмметрической информации в целях инженерных изысканий. М. : Недра, 1984. 220 с.
3. Лобанов А.Н. Фотограмметрия : учебник. М. : Недра, 1984. 552 с.
4. Albertz J. Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2007. 250 p.
5. Ziemann H. Investigation of digital colour images // Enthalten in: Revue française de photogrammétrie et de télédétection. 2006. Vol. 183. Pp. 86–89.
6. Чибуничев А.Г. Фотограмметрия : учебник. М. : Издательство МИИГАиК, 2022. 328 с.
7. Кадничанский С.А. Аэрофотограмметрия и аэрофототопография. СПб. : Первый ИПХ, 2025. 444 с.
8. Кадничанский С.А. Комплексы аэрофототопографические ПАК Геоскан201, ПАК Геоскан701, ПАК ГеосканGemini — средства измерений // Геопрофи. 2024. № 1. С. 9–13.
9. Кадничанский С.А. Сравнительная оценка производительности цифровых аэросъемочных систем // Геопрофи. 2011. № 6. С. 18–24.
10. Kadnichansky S.A., Kurkov M.B., Kurkov V.M., Chibunichev A.G., Trubina L.K. Results of researches on photogrammetric calibration of the Sony CYBER-SHOT

DSC-RX1RM2 camera // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W18. Pp. 73–77. DOI: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w18-73-2019

11. Сутугина И.М., Садовский Б.С. О цифровой фотограмметрической обработке аэроснимков для решения задач строительной отрасли // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 21 DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-21-21. EDN NWE0JA.

12. Сутугина И.М. О применении искусственного интеллекта и аэрокосмических снимков для решения государственных задач // Естественные и технические науки. 2025. № 3 (202). С. 21–26. EDN IJVGFB.

13. Арбузов С.А. Разработка методики автоматизированной обработки аэро- и космических снимков для мониторинга городских территорий : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2011. 23 с.

14. Зиборов М.М. Над строителями появится недреманное космическое око // Отраслевой журнал «Строительство». 2019. № 9. С. 50–52.

15. Торсунова О.Ф. Использование данных космической съемки сверхвысокого разрешения для решения задач территориального зонирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018. Т. 23. № 2. С. 219–230. EDN XSDDFZ.

16. Щеглов М.А., Карелов А.И., Павловский А.А. Методика сбора и анализа разнородной геоинформации для решения задач строительного контроля на объектах строительства железных дорог // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2025. Т. 69. № 2. С. 23–34. DOI: 10.30533/GiA-2025-011. EDN NBYFJX.

17. Щеглов М.А., Карелов А.И., Майоров А.А., Павловский А.А. Мониторинг объектов строительства железнодорожной инфраструктуры с применением данных с беспилотных авиационных систем // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2025. Т. 67. № 5. С. 153–164. DOI: 10.30533/GiA-2023-069. EDN JZMDAD.

18. Плотникова М.А., Хлебникова Е.П. Мониторинг городской территории по материалам космических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 6. № 1. С. 86–93. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-6-1-86-93. EDN EEBCPZ.

19. Василенко Д.В., Пермяков Р.В. Классификация фотограмметрических облаков точек, полученных по стереопарам космических снимков в ЦФС PHOTOMOD, для решения градостроительных задач // Геодезия и картография. 2025. Т. 86. № 4. С. 40–47. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1018-4-40-47. EDN AYTVHS.

Поступила в редакцию 10 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 4 мая 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Ирина Михайловна Сутугина** — преподаватель кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SutuginaIM@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Aerial and satellite imagery can be used to monitor construction projects through digital photogrammetric processing. This topic falls within the field of information support for engineering surveys and construction. The relevance of this topic stems from the fact that not all the potential for implementing digital technologies, remote sensing methods and artificial intelligence has yet been realized in the construction sector. Images serve not only as a raster base for vector maps, but also as a data source aimed at spatial analysis and the development of models for management decision-making.

The use of aerospace survey data enables high-quality and reliable spatial information to be obtained remotely.

Current GOST standards^{1, 2} regulate the conduct of aerial photography and the use of unmanned aerial

systems (UAS) for surveying and exploration work in the construction industry.

GOST R 59328–2021 “Topographic Aerial Photography. Technical Requirements” regulates digital aerial photography carried out for the purpose of producing and updating topographic maps and plans, and for obtaining other spatial data. The standard sets out requirements for the scope of work involved in digital aerial photography, including the quality, presentation and delivery of the resulting materials. GOST applies to contractors and clients of digital aerial photography carried out for the purposes of topographic mapping and cadastral work, and is used during the acceptance of aerial photography materials. It contains requirements for aerial cameras (for example, the presence of a central shutter and the consistency of internal orientation parameters), as well as for survey parameters: it includes appendices with nominal values for the designed overlap of aerial photographs, tolerances for deviations when assessing the photogrammetric quality of materials, and so on. The aim of the standard is to provide technical regulation of the processes involved in the design and implementation of topographic aerial pho-

¹ GOST R 59328–2021. Topographic aerial photography. Technical requirements. 2021.

² GOST R 71886–2024. Unmanned aerial vehicle systems in the construction industry, used for surveying work. 2025.

tography, and to establish requirements for equipment, the quality of the resulting data, their completeness and presentation.

The standard was developed by FSUE “STANDART-INFORM”, FSBI “Centre for Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure” and Geoscan LLC, with the participation of Technical Committee for Standardization TC 404 “Geodesy and Cartography”.

The standard was developed by JSC “Research Centre of Construction” jointly with the A.A. Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, with the participation of more than 30 specialized organizations within the framework of Technical Committee for Standardization TC 465 “Construction”. The standard came into effect on February 1, 2026, with the right of early application.

Classical approaches to the photogrammetric processing of aerial and satellite imagery, and the application of such imagery in various sectors of the economy, are described by the Russian authors N.D. Ilyinsky, A.N. Lobanov, B.K. Malyavsky, A.I. Obiralov and A.A. Fostikov [1–3].

Foreign publications contain material on the acquisition and digital processing of remote sensing data (authors: J. Albertz [4], H. Ziemann [5]).

Among the authoritative sources in the literature, it is worth noting the books and articles by authors such as A.G. Chibunichev [6] and S.A. Kadnichansky et al. [7–10].

A.G. Chibunichev’s book “Photogrammetry: A Textbook for Universities” [6] presents current approaches to the theory and practice of image acquisition and processing in a modern yet classical style. It examines issues relating to projective photogrammetry and the automation of photogrammetric measurements carried out using digital images, the creation of digital models of terrain and topography as well as orthophotos, aerial and ground-based laser scanning, photogrammetric methods for processing images obtained by scanning survey systems, aerial phototopographic surveying technology, as well as issues relating to ground-based photogrammetry [6].

In S.A. Kadnichansky’s monograph “Aerial Photogrammetry and Aerial Phototopography” [7], approaches to digital photogrammetric processing are examined from the perspective of image accuracy and detail; information is provided on modern surveying systems and the assessment of the accuracy of measurements derived from such images, along with algorithms for solving certain problems. Furthermore, [7] examines the theory of image processing, as well as the features, properties and characteristics of digital aerial photographs. It outlines the methods and technological processes involved in aerial phototopographic surveying, including work on the compilation of the original topographic map and plan. The results of various experimental studies presented in [7] can be used to plan and optimize techniques for extracting information

from aerial photographs, and to select parameters for information processing and equipment.

A number of papers have been published on the subject of construction monitoring^{3, 4, 5}. The materials and research cited in the presentation by TerraTech JSC were utilized in the development of the “Sroy-Kontrol” module for Roscosmos’s “Digital Earth” platform.

The research by B.S. Sadovsky and I.M. Sutugina [11, 12], as well as that by M.M. Zibrov [13, 14], is devoted to the application of aerial and satellite imagery and artificial intelligence in construction.

S.A. Arbuzov has developed a methodology for the combined use of brightness, spatial and geometric features for the automated interpretation of aerial and satellite imagery, which makes it possible to improve the accuracy of identifying changes in built-up areas, including determining building heights, as well as monitoring the progress of construction [13].

The use of ultra-high-resolution satellite imagery for land-use zoning is discussed in the work by O.F. Torsunova [15].

Articles by M.A. Shcheglov, A.I. Karelov, A.A. Mayorov and A.A. Pavlovsky present methods for applying GIS technologies to construction supervision using aerial and satellite survey data, and for monitoring railway infrastructure construction projects using information from the BAS [16, 17].

M.A. Plotnikova and E.P. Khlebnikova investigate methods for identifying changes within urban areas associated with the construction of new facilities, renovation and reconstruction, using remote sensing data. The study analyses algorithms for the automated detection of changes using multi-temporal satellite imagery in the ERDAS IMAGINE 2010 software. It identifies the factors that must be taken into account when monitoring urban areas [18].

An article by R.V. Permyakov [19] is devoted to the processing of aerial and satellite imagery for urban planning purposes (the classification of photogrammetric point clouds derived from stereo pairs of satellite images) using the Photomod software suite.

Overall, having analyzed the available information, it can be concluded that the topic of construction monitoring using aerial and satellite imagery is a topical one; there are a number of studies which have analyzed

³ Replacing surveyors and security guards: how drones are used in construction. *Geoscan*. 2022. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/blog/vmesto-geodezista-i-okhrannika-kak-bplaispolzuyutsya-v-stroitelstve?ysclid=mm2xi4xy4d319006035>

⁴ Presentation by TerraTech JSC. Satellite monitoring of construction works. 2026. URL: <https://terratech.ru/solutions/construction/?ysclid=mm3gx2272u4091267>

⁵ A study into the potential use of satellite imagery and drone data for monitoring the progress of construction works. 2025. URL: https://gisproxima.ru/izuchenie_vozmozhnostey?ysclid=mm2xr82yv899424591

the potential applications of aerial and satellite imagery in the construction sector, but it can also be concluded that not all aspects of this issue have yet been explored, and further research is required.

MATERIALS AND METHODS

In order to analyze the representation of construction sites, construction machinery and building materials in digital images, data obtained from Yandex’s search and information mapping service, Yandex Maps, was utilized. Data for the city of Moscow was used: sections of satellite imagery and aerial photography data, combined into a single map coverage of the area. For the analysis, a search was carried out for coverage fragments within the boundaries of construction sites located in Moscow. A study containing examples of aerial and

satellite imagery obtained by various surveying systems used in Germany was also analyzed⁶.

In conducting this study to obtain scientific results, general scientific methods of inquiry were applied: abstraction, analysis, synthesis, grouping, analogy, induction and deduction; as well as modelling and the historical-logical, comparative and systems approaches. The methods used to collect, process and analyse information were determined by the specific objectives of the study.

RESEARCH RESULTS

At present, data from a number of Russian and foreign satellites is available for monitoring construc-

⁶ Flying Camera. Learning from the Bird’s Eye View Geography in Aerial and Satellite Pictures. *DoersdorfGermany*. 2026; 25.



Fig. 1. Extract from a satellite image: *a* — Resurs-P (Russian state satellite), spatial resolution — 0.7 m; frame width — 38 km; *b* — Kanopus-V, ground resolution — 2.5 m



Fig. 2. A constellation of Russian state-owned Kanopus-B satellites with a spatial resolution of 2.5 metres per pixel



Fig. 3. The Russian commercial STILSAT satellite, with a spatial resolution of 0.5 metres per pixel. The satellite is operated by the private space company STILSPACE



Fig. 4. A section of a Chinese Jilin-1 satellite image (EarthScanner) with a ground resolution of 0.5 m per pixel and a frame width of 150 km

tion activities. Furthermore, in 2025, Russia launched 28 satellites for various purposes. According to R. Peryamkov's PAPER "Results of Earth Observation Satellite Launches and Industry Trends in 2025": "Roscosmos plans to launch the Elektro-L No. 5 high-orbit hydro-meteorological satellite have been postponed until 2026. Among private companies, in 2026, the Sputnicks Group plans to launch the Kinosputnik satellite with a resolution of 0.8 m/pixel, whilst the consortium comprising MT-LAB LLC and Stilsoft plans to launch the KOEN satellite with a resolution of 0.5 m/pixel. Furthermore, it is expected that in 2026, 5 billion roubles from the federal fund will be allocated to government customers for the procurement of Earth observation data from private and state-owned satellite companies⁷".

Satellite imagery from the "Resurs-P" satellites, which provide highly detailed imagery of the terrain, is well suited for monitoring construction in terms of resolution and information content, as is data from the high-resolution "Kanopus-V" and "Aist-2T" satellites for stereo imaging and the production of digital topographic maps.

Fig. 1–4 show examples of sections of satellite imagery (optical imagery) from satellites, which can be ordered via the website of TerraTech JSC, a provider of Russian space systems⁸.

To obtain automated expert analytics on construction sites for specific projects, you can use the "Digital Earth" cloud service, specifically the "Construction Monitoring" module. This service provides information on the status of specific sites specified by their coordinates, as well as analytics derived from satellite and aer-

ial imagery. The georeferencing accuracy of the data is 10 metres.

Construction monitoring can also be carried out within organizations using remote sensing data without relying on the service, by employing specialized equipment, software and survey data.

Satellite monitoring of construction works may include the following activities: determining the stages of construction; identifying machinery operating on the construction site; monitoring quarries; monitoring the volume of earthworks, landscaping and the progress of construction; and monitoring the level of activity on site.

Fig. 5–9 show examples of how the above-mentioned processes are depicted in imagery obtained from the "Satellite" tab on Yandex Maps. Yandex Maps indicated that the imagery was obtained in 2024 from aerial photography of the Moscow area.

Yandex Maps cannot be used as a tool for monitoring construction, as it is not possible to obtain information on the date the images were taken or the exact parameters of the survey, nor are there any images taken at regular intervals to monitor the progress of construction. However, the tool is suitable for addressing certain research objectives.

Fig. 10 and 11 allow a comparison of the depiction of construction machinery in satellite imagery and in imagery obtained from aerial photography⁴.

Judging by the images of machinery shown in Fig. 10, it is possible to identify the exact model of the machinery from aerial photographs, thanks to the high resolution of such images. This is more difficult to do using satellite imagery; however, it is possible to establish the presence of specific types of machinery on the construction site.

It is also important to identify and monitor construction materials at the site using aerial and satellite imagery (Fig. 11, based on data from Roscosmos, TerraTech).

The choice of specific types of aerial photographs for construction monitoring will depend to a greater ex-

⁷ Permyakov R.V. *Results of Earth Observation Satellite Launches and Industry Trends in 2025*. 2025. URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/obshchie-voprosy/itogi-zapuskov-kosmicheskikh-apparatov-dzz-i-tendentsii-otrasli-v-2025-godu-/?ysclid=mm3fb0tg1a745825371>

⁸ Optical survey. URL: <https://terratech.ru/data/optika/>

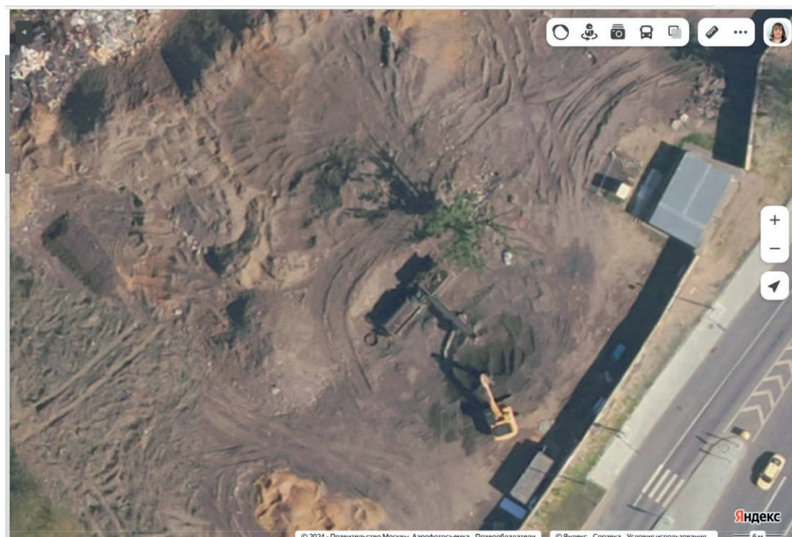


Fig. 5. Drilling and earthworks



Fig. 6. Piles



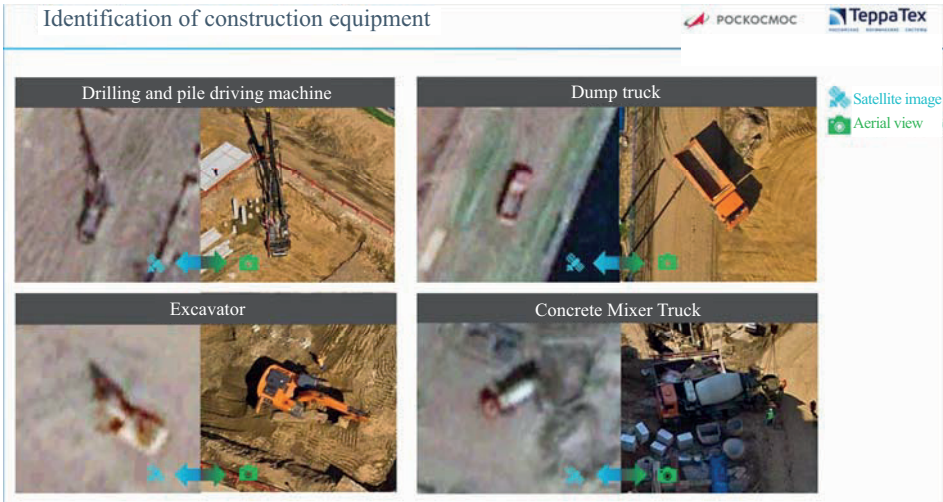
Fig. 7. Construction of storeys



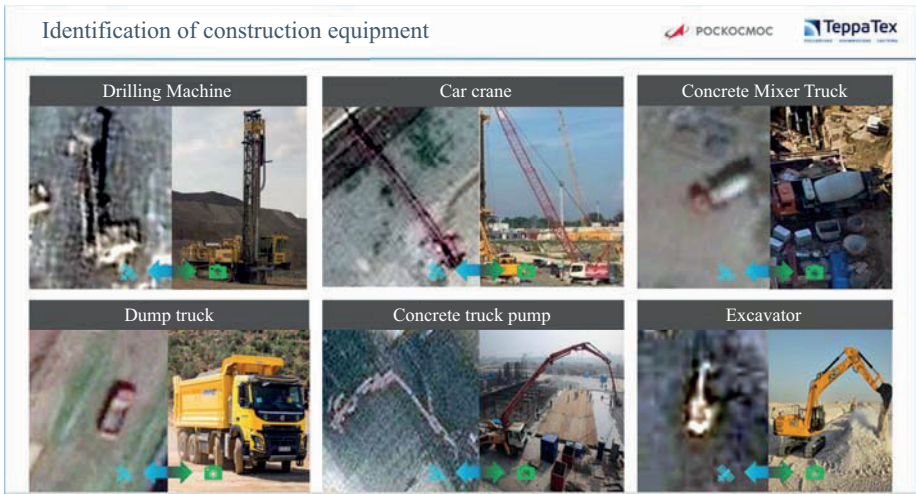
Fig. 8. Interior and exterior finishes, landscaping



Fig. 9. Identification of operational machinery — a crane



a



b

Fig. 10. Identification of construction machinery in satellite and aerial photographs (a); identification of construction machinery in satellite images compared with ground-based photography (b)

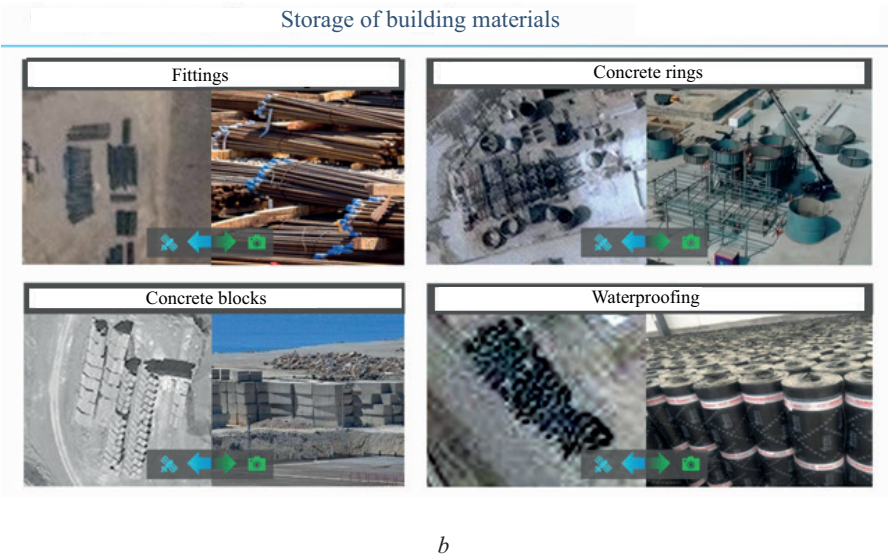
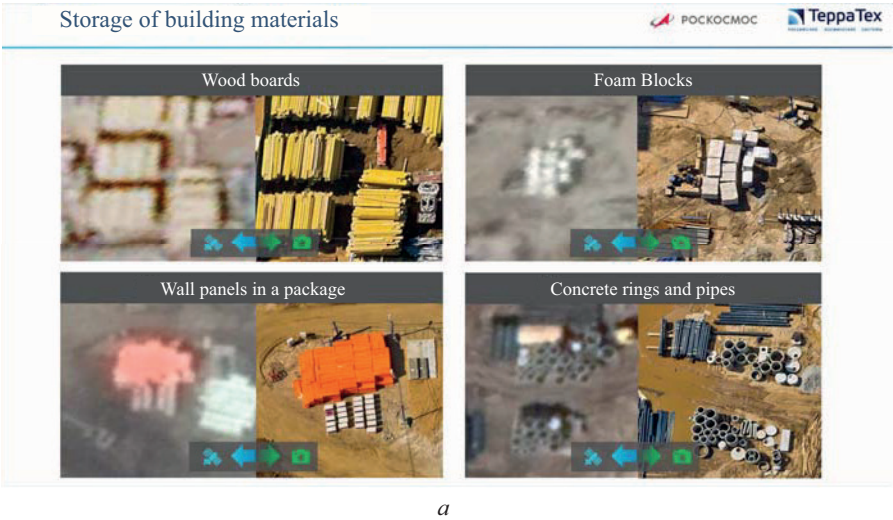


Fig. 11. Storage of building materials: *a* — planks, foam blocks, wall panels in packaging, and concrete rings and pipes; *b* — reinforcing bars, concrete rings, concrete blocks, and waterproofing

tent on the requirements for the representation of fine details in the photographs than on the requirements for geometric accuracy.

The book by S.A. Kadnichansky’s book “Aerial Photogrammetry and Aerial Phototopography” provides information on the technical aspects of aerial photography, surveying methods and processes, the characteristics of aerial cameras, and approaches to assessing the accuracy of data and the resolution of images, including the information presented in Table 1: recommended values for ground-level pixel size for various map or plan scales [7].

The choice of imaging parameters will also be influenced by the actual size of the objects we intend to identify (and interpret) from the images, as they appear on the ground.

Table 2 lists the types of features shown in Fig. 5–11, *b*, and provides approximate minimum sizes for the features or feature elements that should be visible in the images.

For these types, some images with suitable parameters are shown.

It should also be noted that thin, elongated objects (such as reinforcement bars, planks and electrical cables) will be distinguishable as separate entities and will be more easily recognized in images than compact objects, such as blocks, all other things being equal in terms of resolution.

The selection of aerial photography parameters can be illustrated by the following sequence of steps, as described in [17]:

“... 1. The maximum permissible height for photography is calculated as: $H_{\max} = \frac{p\delta h}{\delta(\Delta p)}$, where $H_{\max}$ is the height at which the photograph is taken; p is the mean value of the longitudinal parallaxes of the points in the stereo pair; δh is the permissible error in height deter-

Table 1. Recommended nominal spatial resolution of aerial photographs for the production of a topographic plan or map

The scale of a topographical plan or map	Recommended pixel size on the ground (maximum), cm
1:500	6
1:1000	9
1:2000	20 (14 for urban areas with high-rise and high-density development)
1:5000	30
1:10 000	50
1:25 000	70

Table 2. Dimensions of construction site structures on site

Objects	Size of objects and their elements on the ground (or width of the blurred object boundary on the ground), m	Imagery on which they will be displayed separately
<i>Construction stages</i>		
Drilling and earthworks (terrain elements, equipment)	Equipment (outlines, shape) — 1.00 m 0.50 m 0.30 m 0.10 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.30–0.50 m
Reinforced concrete piles	0.20–3.00 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.30–0.50 m
Floor construction (walls), interior and exterior finishing	For external walls in temperate latitudes, the standard thickness is 0.51 m (2-brick wall). In northern regions, 0.64 m (2.5-brick wall). For internal walls, masonry with a thickness of 0.25–0.38 m is used. For interior, inter-apartment, and office permanent partitions — not less than 0.12 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.30 m
<i>Construction equipment</i>		
Drilling rig, dump truck, crane, excavator (equipment elements such as wheels, headlights, fenders)	0.10 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m
<i>Construction materials</i>		
Boards	Thickness 0.013–0.016 m — for sheathing 0.020–0.025 m — for floors and partitions; 0.040–0.050 m — for load-bearing structures and formwork up; to 0.075 m — for heavily loaded elements	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m
Foam concrete blocks	Dimensions 0.60 × 0.30 × 0.20 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.30 m
Reinforcing bars	Diameter from 0.01 m and above	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m
Concrete rings	Diameter from 0.70 to 2.50 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.30 m
Waterproofing materials (e.g., roll materials, hydroisol)	Width — 1.00 m. Length — 8.00, 10.00 or 15.00 m	Aerial imagery with a ground resolution of 0.06–0.10 m. Satellite imagery with a resolution of 0.50 m

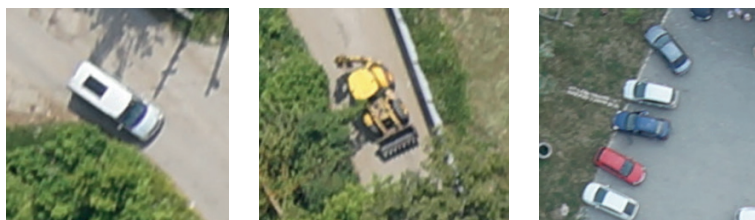


Fig. 12. Examples of enlarged sections of digital aerial photographs taken by an unmanned aerial vehicle, showing the equipment

mination; $\delta(\Delta p)$ is the error in determining the difference in longitudinal parallaxes.

2. The denominator of the survey scale is calculated as follows: $m \leq \frac{\delta_{pl}}{\delta_{ph}} M$, where m is the denominator of the photograph scale; δ_{pl} is the permissible error in determining the position of a point on the plan; δ_{ph} is the error in measuring a point on the photograph; M is the denominator of the plan scale.

3. The calculated parameters are adjusted to take account of the final accuracy requirements for a specific construction project.

4. The focal length is calculated using the formula: $f = H/m$, where f is the camera's focal length".

It should be noted that there are other possible methods for selecting imaging parameters.

The use of unmanned aerial vehicles (UAV) for monitoring construction sites is becoming increasingly common. The use of UAV enables high-quality images of land plots to be captured, work progress to be tracked, and progress to be assessed in real time.

Below are details on calculating the ground resolution for imagery captured by a Sony DSC-RX1R camera mounted on a UAV. These images clearly showed construction machinery, plot boundaries, buildings and building materials.

Let's work out the scale of the aerial photograph (as it will be captured on a digital camera's sensor): the image format (dimensions) for this camera will be 6,000 pixels (36.0000 mm) by 4,000 pixels (24.0000 mm).

Let's work out the physical size of a pixel for each side of the image frame:

- $36 \text{ mm}/6,000 \text{ pixels} = 0.006 \text{ mm} = 6 \text{ }\mu\text{m}$;

- $24 \text{ mm}/4,000 \text{ pixels} = 0.006 \text{ mm} = 6 \text{ }\mu\text{m}$.

We shall determine the denominator of the image scale using the formula: $1/m = f/H$.

- $m = 12,687$;
- $f = 34 \text{ mm}$ — the camera's focal length;
- $H = 12,683 \cdot 0.0340925 = 432.53 \text{ m}$ — the shooting height.

The ground resolution (the size of the smallest object that will be visible in the image) will be $\text{pix} = 0.006 \text{ mm}$ — in the image; 0.006 mm in the image corresponds to $0.006 \cdot 12,687 = 76.122 \text{ mm}$ on the ground.

The pixel size, or ground resolution, will correspond to $\text{pix} = 7.6 \text{ cm}$.

Fig. 12 shows examples of images of machinery for the survey material described above.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on the material discussed above and Table 2, it can be concluded that, for monitoring construction, the optimal approach is to use aerial photography from aeroplanes and UAV with a ground resolution of between 0.06 and 0.10 m ; it is also possible to use ultra-high-resolution satellite imagery with a resolution of 0.30 m . The examples given have shown which features will be distinguishable in the images.

The use of UAV for monitoring construction sites is a more convenient option, as it allows the required number of surveys to be carried out at specified time intervals using simpler surveying equipment than that required for aerial photography with professional aerial cameras [8].

Further work on this topic is planned, taking into account the results obtained.

REFERENCES

1. Ilyinsky N.D., Obiralov A.I., Fostikov A.A. *Photogrammetry and image decoding : textbook*. Moscow, Nedra, 1986; 375. (rus.).
2. Malyavsky B.K., Zharnovsky A.A. *Analytical processing of photogrammetric information for the purposes of engineering surveys*. Moscow, Nedra, 1984; 220. (rus.).

3. Lobanov A.N. *Photogrammetry : textbook*. Moscow, Nedra, 1984; 552. (rus.).
4. Albertz J. Einführung in die Fernerkundung. *Grundlagen der Interpretation von Luft und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2007; 250.
5. Ziemann H. Investigation of digital colour images. *Enthalten in: Revue française de photogrammétrie et de télédétection*. 2006; 183:86-89.
6. Chibunichev A.G. *Photogrammetry : textbook*. Moscow, Publishing House MIIGAiK, 2022; 328. (rus.).
7. Kadnichansky S.A. *Aerophotogrammetry and aerophotopography*. St. Petersburg, First IPKH, 2025; 444. (rus.).
8. Kadnichansky S.A. Aerial phototopographic complexes PAK Geoscan201, PAK Geoscan701, PAK GeoscanGemini — measuring instruments. *Geoproti*. 2024; 1:9-13. (rus.).
9. Kadnichansky S.A. Comparative assessment of the performance of digital aerial photography systems. *Geoproti*. 2011; 6:18-24. (rus.).
10. Kadnichansky S.A., Kurkov M.B., Kurkov V.M., Chibunichev A.G., Trubina L.K. Results of researches on photogrammetric calibration of the Sony CYBERSHOT DSC-RX1RM2 camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019; XLII-2/W18:73-77. DOI: 10.5194/isprs-archives-xxlii-2-w18-73-2019
11. Sutugina I., Sadovskiy B. Regarding digital photogrammetric processing of aerial photos to create solutions for the construction industry. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):21. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-21-21. EDN NWEQJA. (rus.).
12. Sutugina I.M. On the use of artificial intelligence and aerospace imagery to solve government problems. *Natural and Technical Sciences*. 2025; 3(202):21-26. EDN IJVGILB. (rus.).
13. Arbuzov S.A. *Development of a methodology for automated processing of aerial and satellite images for monitoring urban areas : abstract of a diss. ... cand. of technical sciences*. Novosibirsk, 2011; 23. (rus.).
14. Ziborov M. An unsleeping cosmic eye will appear above the builders. *Branch journal "Construction"*. 2019; 9:50-52. (rus.).
15. Torsunova O.F. Use of aerial superresolution survey data for solving the tasks of territorial zoning. *Vestnik SGUGiT*. 2018; 23(2):219-230. EDN XSDDFZ. (rus.).
16. Scheglov M.A., Karelov A.I., Pavlovsky A.A. The methodology of collecting and analyzing heterogeneous geoinformation for solving problems of construction control at railway construction sites. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025; 69(2):23-34. DOI: 10.30533/GiA-2025-011. EDN NBYFJX. (rus.).
17. Scheglov M.A., Karelov A.I., Maiorov A.A., Pavlovsky A.A. Monitoring of railway infrastructure construction facilities using data from unmanned aircraft systems. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025; 67(5):153-164. DOI: 10.30533/GiA-2023-069. EDN IJZMDAD. (rus.).
18. Plotnikova M.A., Khlebnikova E.P. Monitoring of urban area with satellite imagery. *Interexpo GEO-Siberia*. 2019; 6(1):86-93. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-6-1-86-93. EDN EEBPZ. (rus.).
19. Vasilenko D.V., Permyakov R.V. Classification of photogrammetric point clouds obtained from stereo pairs of satellite images with photomod dps for solving urban planning tasks. *Geodesy and Cartography*. 2025; 86(4): 40-47. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1018-4-40-47. EDN AYTIVHS. (rus.).

Received March 10, 2026.

Adopted in revised form on April 11, 2026.

Approved for publication on May 4, 2026.

B I O N O T E S : **Irina M. Sutugina** — lecturer at the Department of Information Systems, Technologies, and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SutuginaIM@mgsu.ru.

Влияние вторичной консолидации на длительные осадки оснований фундаментных плит большой площади

Армен Завенович Тер-Мартirosян, Любовь Юрьевна Романенко, Виктория Владимировна Рудь, Полина Владимировна Шишкина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается задача оценки влияния ползучести (вторичной консолидации) на длительные осадки оснований фундаментных плит большой площади. Работа продолжает ранее выполненное авторами исследование роли анизотропии фильтрационных свойств грунта в процессе двумерной консолидации и сосредоточена на количественной оценке вклада ползучести грунтового скелета в общую величину осадки.

Материалы и методы. Проведено параметрическое численное исследование методом конечных элементов (Plaxis 2D) для осесимметричной модели фундаментной плиты на глинистом основании. Осуществлено сопоставление моделей Soft Soil (SS, без учета ползучести) и Soft Soil Creep (SSC, с учетом) при варьировании соотношения R/H (0,5; 2,0; 6,0), модифицированного индекса ползучести μ^* (0,005; 0,01) и коэффициента анизотропии фильтрации k_x/k_y (1; 5). Дополнительно исследовано влияние горизонтальных песчаных прослоев.

Результаты. Ползучесть способна увеличивать конечную осадку в 1,5–5,4 раза в зависимости от геометрии задачи и интенсивности ползучести (коэффициент η). Дренарующие прослои ускоряют первичную консолидацию в 3–11 раз, однако снижают итоговую осадку при наличии ползучести лишь на 5–16 %. Анизотропия проницаемости не оказывает существенного влияния на конечную осадку (расхождение менее 2 %).

Выводы. Учет вторичной консолидации обязателен при $\mu^* \geq 0,005$ ($Ca/Cc \geq 0,10$), характерном для органоминеральных глин и заторфованных грунтов. Горизонтальные дренарующие слои не устраняют проблему длительных вторичных осадок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вторичная консолидация, ползучесть, фундаментная плита, Soft Soil Creep, метод конечных элементов, Plaxis, осадки во времени, песчаные прослои

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Романенко Л.Ю., Рудь В.В., Шишкина П.В. Влияние вторичной консолидации на длительные осадки оснований фундаментных плит большой площади // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.4

Автор, ответственный за переписку: Виктория Владимировна Рудь, victoriadll@yandex.ru.

Effect of secondary consolidation on long-term settlements of large-area raft foundations

Armen Z. Ter-Martirosyan, Lyubov Yu. Romanenko, Victoria V. Rud, Polina V. Shishkina

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

ABSTRACT

Introduction. This paper evaluates the effect of creep (secondary consolidation) on long-term settlements of large-area raft foundations. The study extends the authors' previous work on the role of permeability anisotropy in two-dimensional primary consolidation and focuses on quantifying the contribution of skeleton creep to total settlement.

Materials and methods. A parametric finite element study was carried out using Plaxis 2D for an axisymmetric raft foundation model on a clay stratum. The Soft Soil (SS, no creep) and Soft Soil Creep (SSC) models were compared while varying R/H (0.5; 2.0; 6.0), the modified creep index μ^* (0.005; 0.01) and permeability anisotropy k_x/k_y (1; 5). The effect of horizontal sand interlayers was also investigated.

Results. Creep can increase the final settlement by a factor of 1.5–5.4 depending on R/H and μ^* (coefficient η). Sand interlayers accelerate primary consolidation by a factor of 3–11 but reduce the creep-related final settlement by only 5–16 %. Permeability anisotropy has a negligible effect on final settlement (difference below 2 %).

Conclusions. Secondary consolidation must be accounted for when $\mu^* \geq 0.005$ ($Ca/Cc \geq 0.10$), typical of soft organomineral clays, peaty soils, and silts. Horizontal drainage layers do not eliminate the problem of long-term secondary settlements.

KEYWORDS: secondary consolidation, creep, raft foundation, Soft Soil Creep, finite element method, Plaxis, time-dependent settlement, sand interlayers

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Romanenko L.Yu., Rud V.V., Shishkina P.V. Effect of secondary consolidation on long-term settlements of large-area raft foundations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.4

Corresponding author: Victoria V. Rud, victoriadll@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Задача прогнозирования длительных осадков фундаментов на слабых глинистых грунтах сохраняет свою актуальность на протяжении всей истории развития механики грунтов. В ранее опубликованной работе авторов [1] проведено параметрическое исследование влияния двумерного характера фильтрации и анизотропии проницаемости на скорость первичной консолидации оснований плитных фундаментов. Было показано, что классическая одномерная теория К. Терцаги [2] при малых отношениях R/H может завышать расчетное время консолидации более чем вдвое. Тем не менее рассмотренная модель не учитывала реологические свойства грунта, и прогноз осадков ограничивался первичной фильтрационной консолидацией.

Между тем для природных мягких глин деформирование грунтового скелета не прекращается после полной диссипации избыточного порового давления. Это явление, именуемое вторичной консолидацией или ползучестью, впервые системно описано Л. Бьеррумом [3], предложившим концепцию «мгновенной» и «отложенной» компрессии. Количественная характеристика интенсивности ползучести через отношение S_α/S_c была обоснована Г. Месри и П.М. Годлевски [4], установившими, что для минеральных глин S_α/S_c составляет 0,02–0,06, а для органических грунтов возрастает до 0,10–0,20. Дальнейшее развитие этой концепции выполнено Г. Месри и А. Кастро [5].

Центральным дискуссионным вопросом в теории вторичной консолидации остается момент начала ползучести относительно первичной консолидации. С.С. Ладд и соавт. [6] сформулировали две альтернативные позиции: гипотезу *A* (ползучесть начинается после завершения первичной консолидации) и гипотезу *B*, поддержанную Л. Бьеррумом [3], допускающую одновременное протекание ползучести и фильтрационной консолидации. В отечественной науке аналогичные идеи развивались в трудах С.Р. Месцяна [7], С.С. Вялова [8] и Ю.К. Зарецкого [9].

Разработана методика верификации параметров модели SSC путем сопоставления численного моделирования компрессионных испытаний в Plaxis с лабораторными данными [10].

Численная реализация гипотезы *B* предложена Л. Шукнехтом [11] через изотактическую концепцию. На этой основе П.А. Вермеер и Х.П. Неер [12] разработали модель Soft Soil Creep (SSC), ставшую одной из наиболее распространенных конститутивных моделей для расчета ползучести мягких грунтов в рамках метода конечных элементов (МКЭ). Парал-

лельно Дж.-Х. Ин и Дж. Грэхем [13] предложили вязкоупругопластическую модель на основе гипотезы М. Леони и соавт. [14], разработали анизотропную версию SSC. Обзор изотактического подхода представлен С. Лероуэлем [15]. С.А. Дегаго и соавт. [16] показали, что аргументы сторонников гипотезы *A* могли содержать систематическую ошибку интерпретации.

Практическое применение моделей ползучести к задачам фундаментостроения исследовано в ряде работ. П. Бхартия и соавт. [17] выполнили численный анализ свайно-плитных фундаментов на глинистых грунтах и продемонстрировали существенное влияние вязкопластических свойств на перераспределение нагрузки. Дж. Юань и соавт. [18] провели сравнение гипотез *A* и *B* с использованием трех EVP-моделей, подтвердив превосходство гипотезы *B* для прогноза осадков толстых слоев. Методология МКЭ для задач фильтрационной консолидации изложена Д.М. Поттсом и Л. Здравкович [19] на основе теории М.А. Био [20].

Практическая значимость задачи усиливается тем, что круглые фундаментные плиты значительного диаметра широко применяются в нефтегазовой отрасли в качестве оснований вертикальных резервуаров, газгольдеров и колонного оборудования. Площадки таких объектов нередко отнесены к прибрежным и пойменным территориям с выраженными реологическими свойствами грунтов. Неучет ползучести способен привести к существенной недооценке длительных осадков и нарушению эксплуатационной пригодности сооружений.

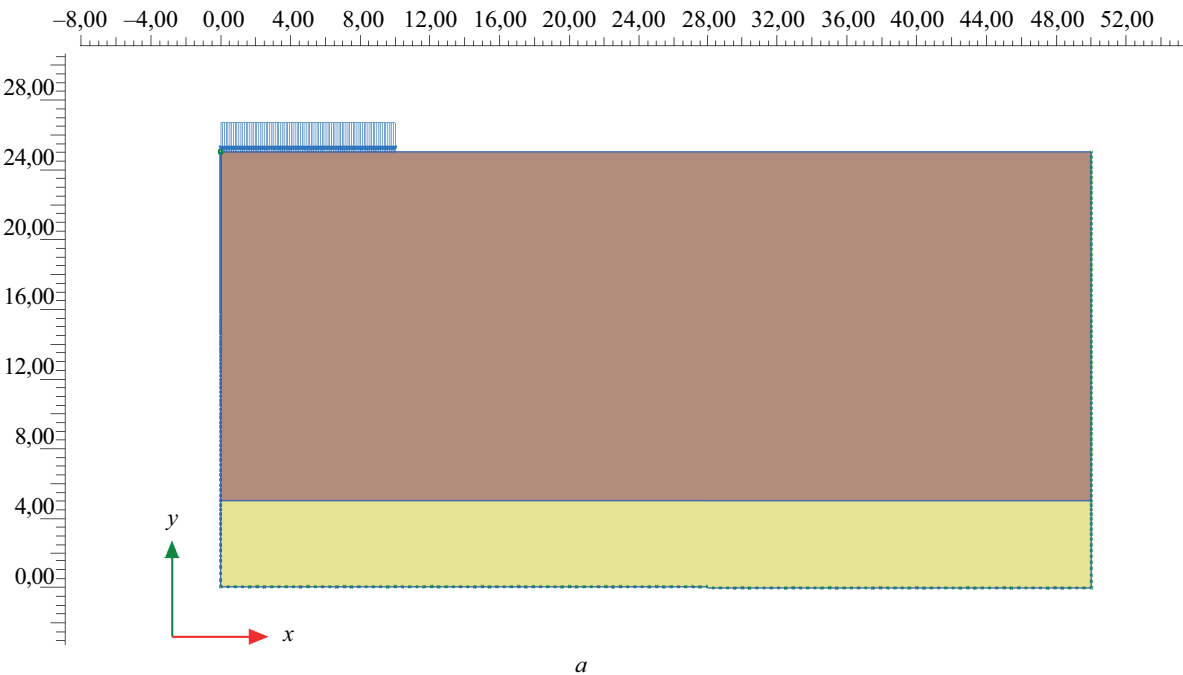
Несмотря на значительный объем теоретических исследований, систематическое параметрическое исследование, позволяющее количественно оценить вклад вторичной консолидации в осадку плитных фундаментов большой площади с варьированием ключевых геометрических и реологических факторов, в литературе не представлено. Целью настоящей работы является восполнение этого пробела.

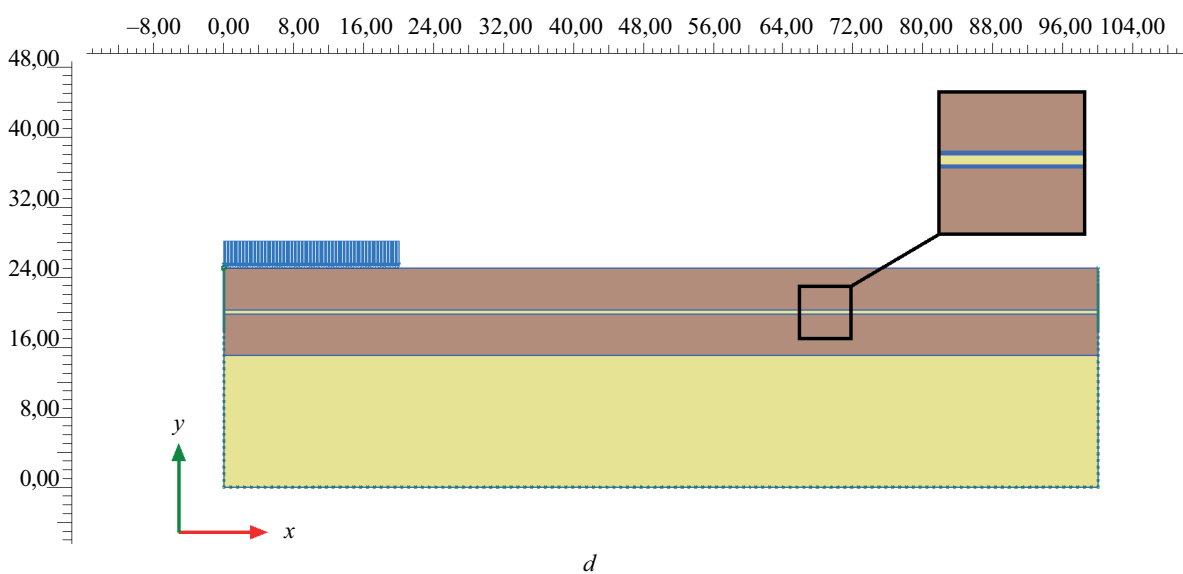
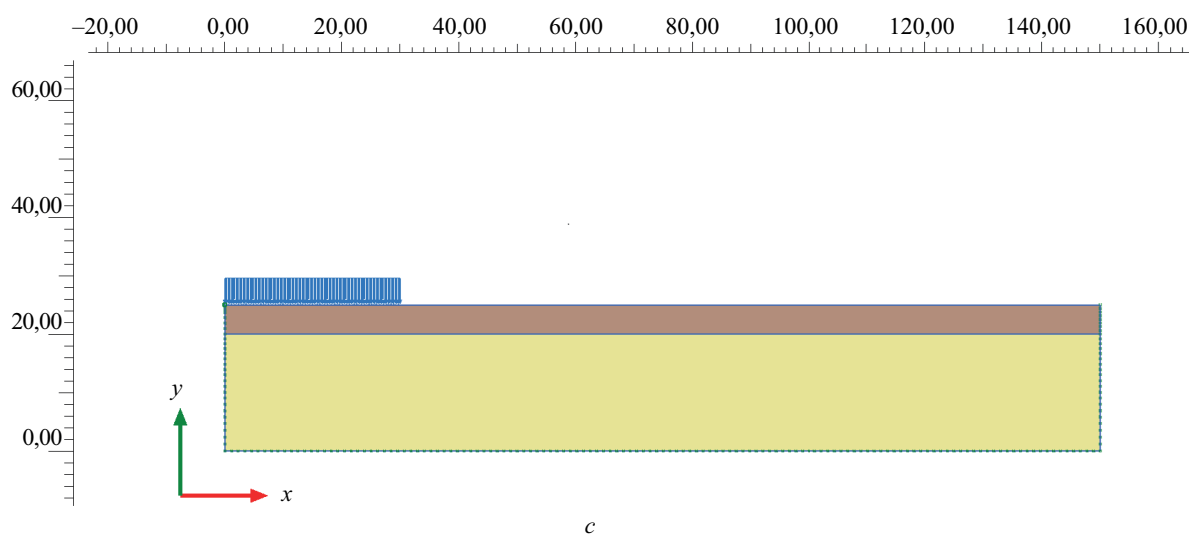
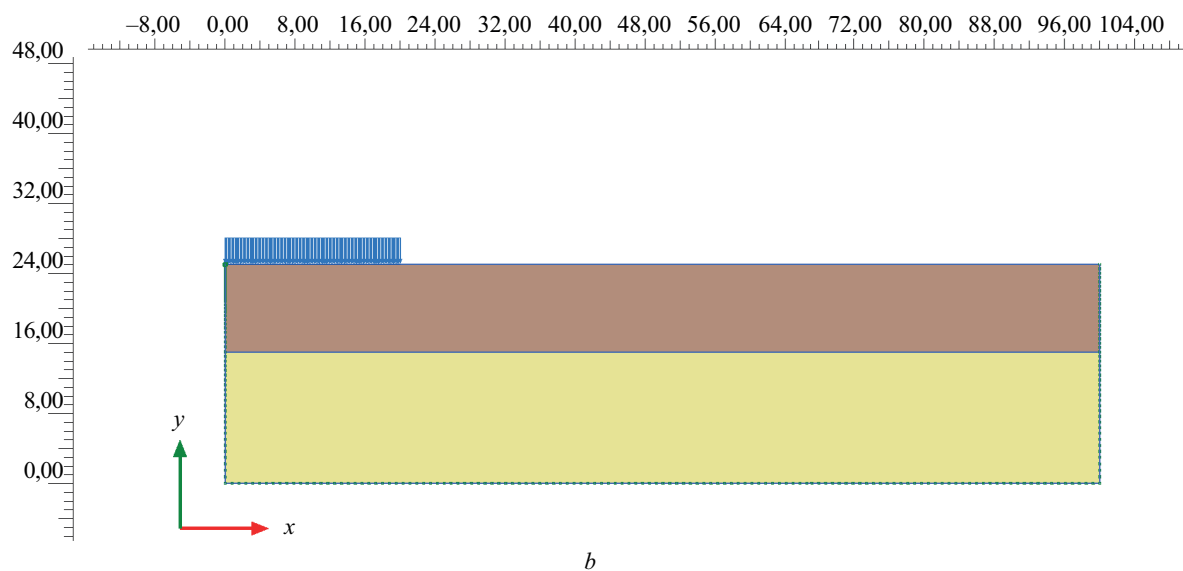
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вычислительный эксперимент выполнен в программном комплексе Plaxis 2D. В осесимметричной постановке рассматривался круглый жесткий плитный фундамент, опирающийся на двухслойное основание: верхний глинистый слой мощностью H и песчаный подстилающий слой; общая высота расчетной области $y_{\max}$ принята равной 25 м. Плита задавалась конечным элементом Plate с жесткостями $EA = 3 \cdot 10^7$ кН/м и $EI = 2,5 \cdot 10^6$ кН·м²/м; равномерная нагрузка прикладывалась на плиту в размере $q = 100$ кПа.

Табл. 1. Матрица расчетных вариантов

Номер	Геометрия	R , м	H , м	R/H	k_x/k_y	Модель	μ^*
1	A	10	20	0,5	1	SS	–
2	A	10	20	0,5	5	SS	–
3	A	10	20	0,5	1	SSC	0,005
4	A	10	20	0,5	5	SSC	0,005
5	A	10	20	0,5	1	SSC	0,01
6	A	10	20	0,5	5	SSC	0,01
7	B	20	10	2,0	1	SS	–
8	B	20	10	2,0	5	SS	–
9	B	20	10	2,0	1	SSC	0,005
10	B	20	10	2,0	5	SSC	0,005
11	B	20	10	2,0	1	SSC	0,01
12	B	20	10	2,0	5	SSC	0,01
13	C	30	5	6,0	1	SS	–
14	C	30	5	6,0	5	SS	–
15	C	30	5	6,0	1	SSC	0,005
16	C	30	5	6,0	5	SSC	0,005
17	C	30	5	6,0	1	SSC	0,01
18	C	30	5	6,0	5	SSC	0,01
19	D (1 прослой)	20	10	2,0	1	SS	–
20	E (3 прослая)	20	10	2,0	1	SS	–
21	D (1 прослой)	20	10	2,0	1	SSC	0,01
22	E (3 прослая)	20	10	2,0	1	SSC	0,01





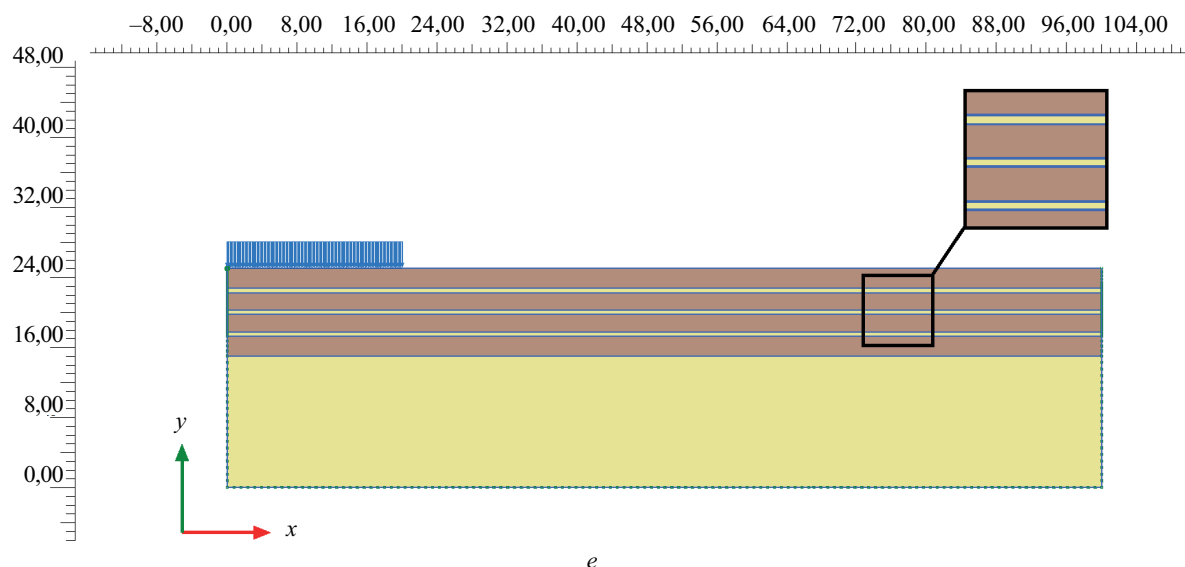


Рис. 1. Расчетные схемы: а — $R/H = 0,5$; б — $R/H = 2,0$; в — $R/H = 6,0$; д — $R/H = 2,0$, один песчаный прослой; е — $R/H = 2,0$, три песчаных прослоя

В отличие от работы [1], в которой учитывалась только первичная консолидация, здесь для глинистого слоя применяются параллельно две модели грунта — Soft Soil (SS) и Soft Soil Creep (SSC). Парный расчет позволяет выделить вклад ползучести в чистом виде, сопоставляя результаты на одном и том же наборе исходных данных. Для глинистого слоя приняты следующие параметры: $\gamma_{sat} = 20 \text{ кН/м}^3$; $\lambda^* = 0,05$; $\kappa^* = 0,01$; $c' = 20 \text{ кПа}$; $\phi' = 22^\circ$; $v'_{ur} = 0,15$; $e_0 = 0,8$; $k_y = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м/сут.}$

Для песчаного подстилающего слоя принята модель Мора – Кулона в дренированной постановке со следующими характеристиками: $E' = 40 \text{ МПа}$; $v' = 0,3$; $c' = 1 \text{ кПа}$; $\phi' = 35^\circ$; $k = 1 \text{ м/сут.}$ Положение уровня грунтовых вод принято на отметке дневной поверхности.

Расчет выполнялся в две стадии: на первой (Plastic, Staged construction) нагрузка прикладывалась мгновенно, с обнулением деформаций от собственного веса; на второй (Consolidation, Staged construction) моделировался совместный процесс фильтрационной консолидации и ползучести на горизонте 18 250 сут., что соответствует 50 годам. Фиксированный временной интервал выбран намеренно: автоматический критерий Plaxis по минимальному поровому давлению останавливает расчет на границе первичной консолидации и не позволяет проследить дальнейшее развитие вторичных деформаций.

Численное исследование включает 22 варианта и построение по матричной схеме с варьированием четырех факторов: соотношения радиуса плиты и мощности глинистого слоя ($R/H = 0,5$; 2,0 и 6,0), коэффициента анизотропии фильтрации ($k_x/k_y = 1$ и 5), модифицированного индекса ползучести μ^* (значения 0; 0,005 и 0,01; нулевое значение соответствует модели SS) и наличия горизонтальных песчаных прослоев мощностью по 0,5 м — один прослой в се-

редине слоя либо три равномерно распределенных (геометрия В). Выбранный диапазон $\mu^* = 0,005\text{--}0,01$ соотносится с отношением $C\alpha/Cc \approx 0,10\text{--}0,20$, характерным для органоминеральных глин и заторфованных грунтов [4, 5]. Полная матрица вариантов сведена в табл. 1, соответствующие расчетные схемы представлены на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты численного моделирования

На рис. 2 приведены графики развития осадки центра плиты во времени для трех исследованных соотношений R/H при $\mu^* = 0$ (SS), 0,005 и 0,01 (SSC) и двух значений k_x/k_y .

Характер кривых для всех геометрий обнаруживает единую закономерность: варианты SS достигают стационарного значения осадки по завершении диссипации порового давления, тогда как кривые SSC монотонно нарастают в течение всего 50-летнего горизонта моделирования. Интенсивность роста вторичной консолидации возрастает пропорционально μ^* , что согласуется с теоретическими положениями [12, 15].

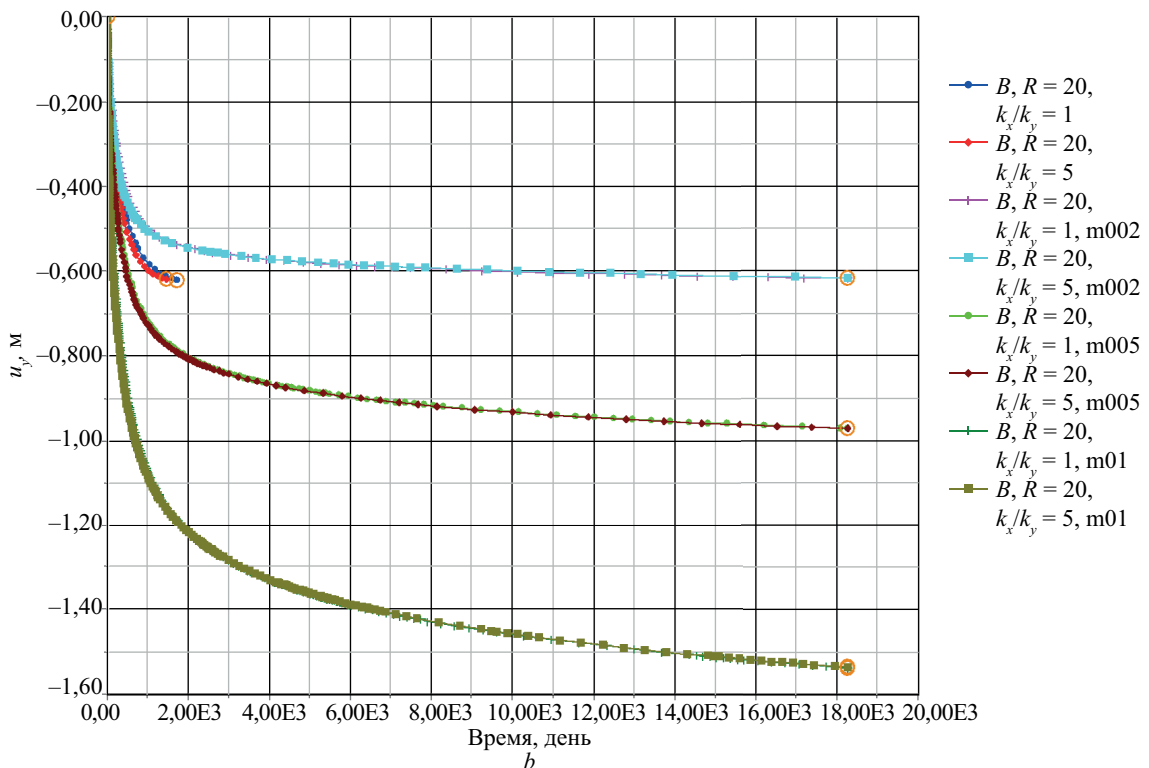
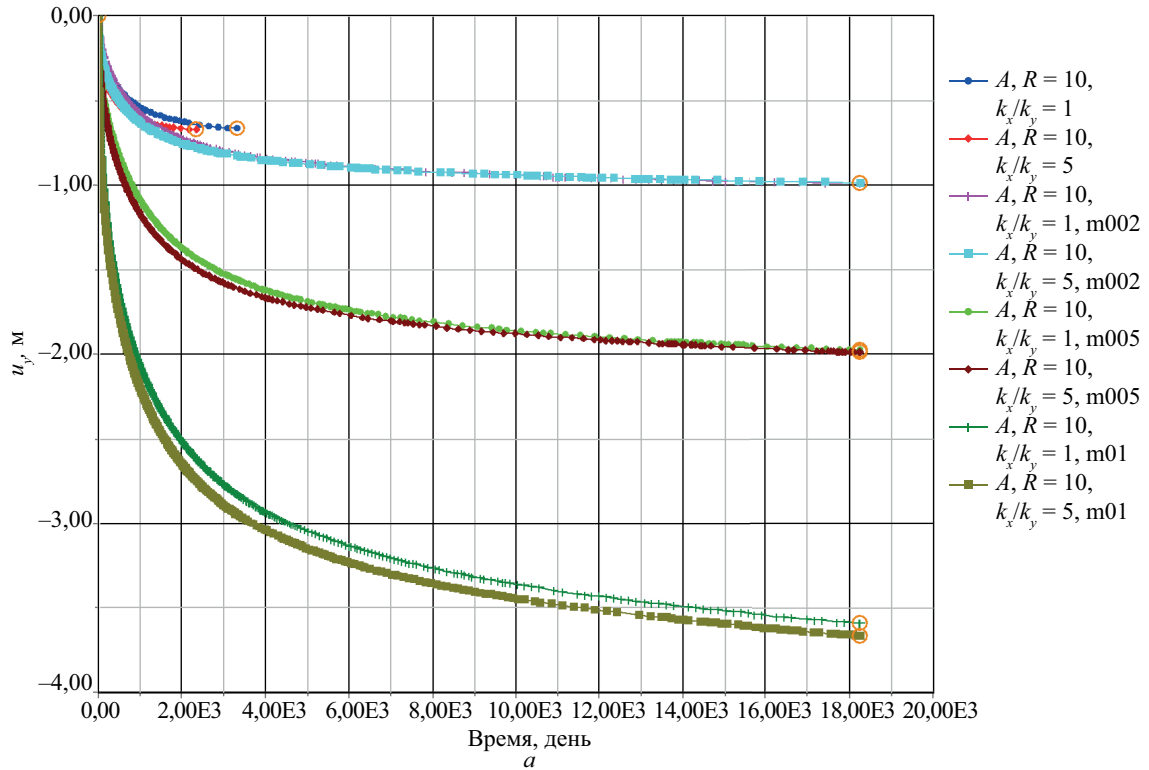
Численные значения конечных осадок систематизированы в табл. 2. Для каждого варианта вычислены относительное приращение $\Delta s = (s_{SSC} - s_{SS})/s_{SS} \cdot 100 \%$ и безразмерный коэффициент увеличения осадки $\eta = s_{SSC}/s_{SS}$.

Анализ табл. 2 показывает, что степень влияния ползучести в большей степени определяется геометрией расчетного сечения. Для глубокого слоя ($R/H = 0,5$, $H = 20 \text{ м}$) коэффициент η при $\mu^* = 0,01$ достигает 5,4 — ползучесть увеличивает осадку более чем в пять раз. При промежуточной геометрии ($R/H = 2,0$) $\eta = 2,5$, а для тонкого слоя ($R/H = 6,0$) $\eta = 1,6$.

Физическая причина данной зависимости связана с масштабом времени первичной консолидации. В условиях большой мощности сжимаемой толщи

диссипация порового давления занимает многие годы, и ползучесть, действующая параллельно (гипотеза В), накапливает дополнительные деформации. При коротких путях фильтрации (большие R/H) первичная консолидация завершается быстро, и накопление вторичных деформаций ограничено.

Влияние анизотропии проницаемости на итоговую осадку за 50-летний горизонт оказалось пренебрежимо малым: расхождение между вариантами $k_x/k_y = 1$ и $k_x/k_y = 5$ не превышает 2 % для всех геометрий. Условия дренирования контролируют лишь скорость первичной консолидации, тогда как конеч-



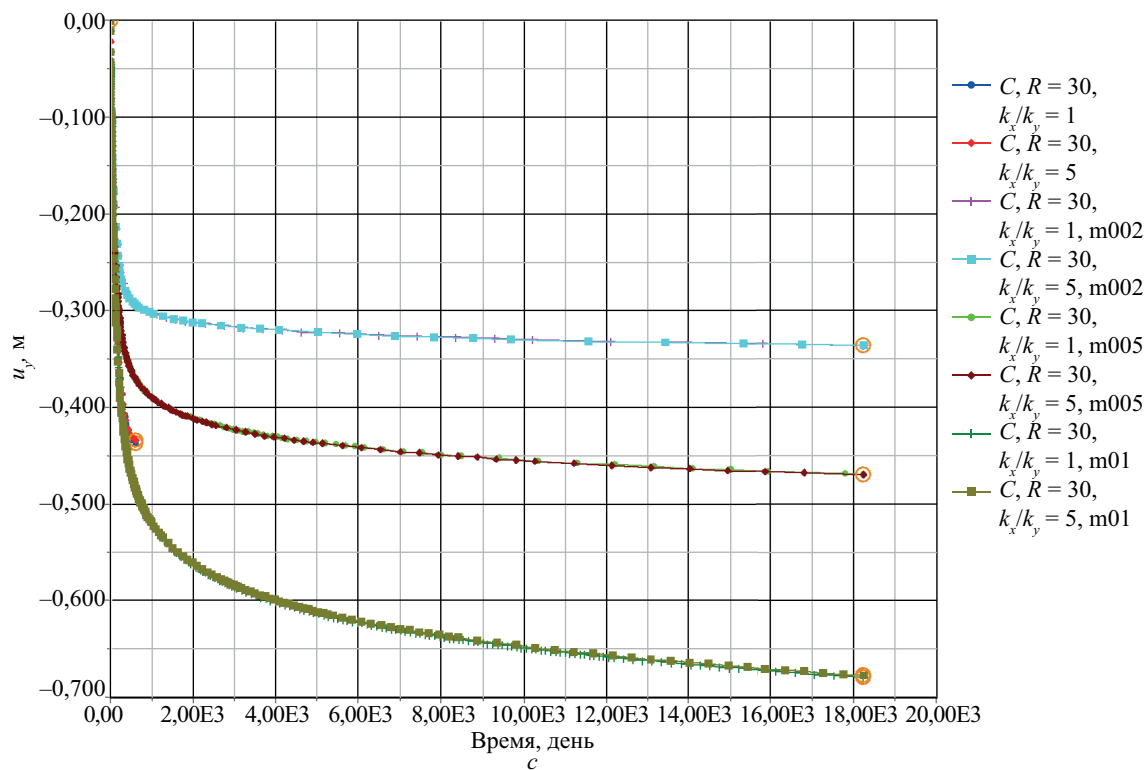


Рис. 2. Кривые «осадка центра плиты – время» для: *a* — $R/H = 0,5$ (геометрия *A*); *b* — $R/H = 2,0$ (геометрия *B*); *c* — $R/H = 6,0$ (геометрия *C*)

Табл. 2. Результаты параметрического исследования (конечные осадки при $t = 50$ лет)

Номер	R/H	k_x/k_y	s_{SS} , мм	$s(\mu^* = 0,005)$, мм	$s(\mu^* = 0,01)$, мм	$\Delta s(0,005)$, %	$\Delta s(0,01)$, %	$\eta(0,01)$
1	0,5	1	668	1990	3592	198	438	5,38
2	0,5	5	673	1990	3664	196	444	5,44
3	2,0	1	620	972	1538	57	148	2,48
4	2,0	5	618	972	1536	57	148	2,49
5	6,0	1	437	469	679	7	55	1,55
6	6,0	5	433	470	677	9	56	1,56

ная осадка при наличии ползучести определяется реологическими свойствами грунта.

На рис. 3 представлены кривые диссипации избыточного порового давления в центре глинистого слоя.

Дополнительно можно отметить, что примечательной чертой полученных результатов является превышение начального значения P_{excess} над приложенной нагрузкой ($q = 100$ кПа) в расчетах с моделью SSC. При $R/H = 0,5$ и $\mu^* = 0,01$ пиковое поровое давление в середине слоя составляет порядка 160 кПа. Этот эффект отражает механизм SSC: вязкопластическая деформация скелета стремится опередить скорость фильтрационного отжатия воды, порождая дополнительное приращение порового давления, т.е. иллюстрацию гипотезы *B* [3, 6, 17]. Для тонкого слоя ($R/H = 6,0$) избыточное поровое давление диссипирует

за ~500 сут. даже при $\mu^* = 0,01$, тогда как осадки продолжают нарастать на протяжении десятилетий.

Результаты расчетов для вариантов с песчаными прослоями (№ 19–22) сопоставлены с однородным основанием в табл. 3 и на рис. 4.

Введение песчаных прослоев кардинально ускоряет первичную консолидацию: время стационарного состояния по модели SS сокращается с ~1700 сут. до ~540 сут. (один прослой) и до ~150 сут. (три прослоя). Конечная осадка SS уменьшается на 4,5 и 14,2 % соответственно.

Для модели SSC с $\mu^* = 0,01$ осадка составляет 1463 мм (1 прослой) и 1286 мм (3 прослоя) вместо 1538 мм при однородном основании. Ключевой вывод: «хвост» ползучести сохраняется — скорость нарастания вторичных деформаций практически не зависит от наличия дренирующих элементов.

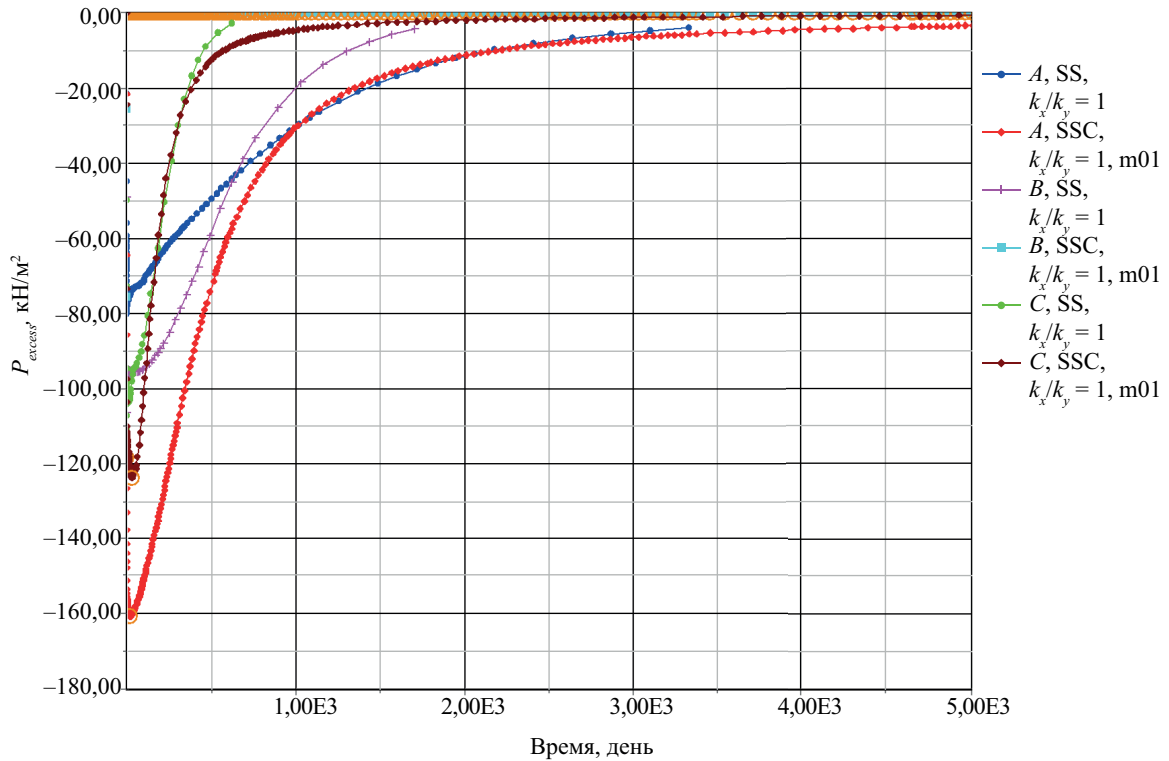


Рис. 3. Диссипация избыточного порового давления для геометрий *A, B* и *C*: сплошные линии — SS; штриховые — SSC ($\mu^* = 0,01$), $k_x/k_y = 1$)

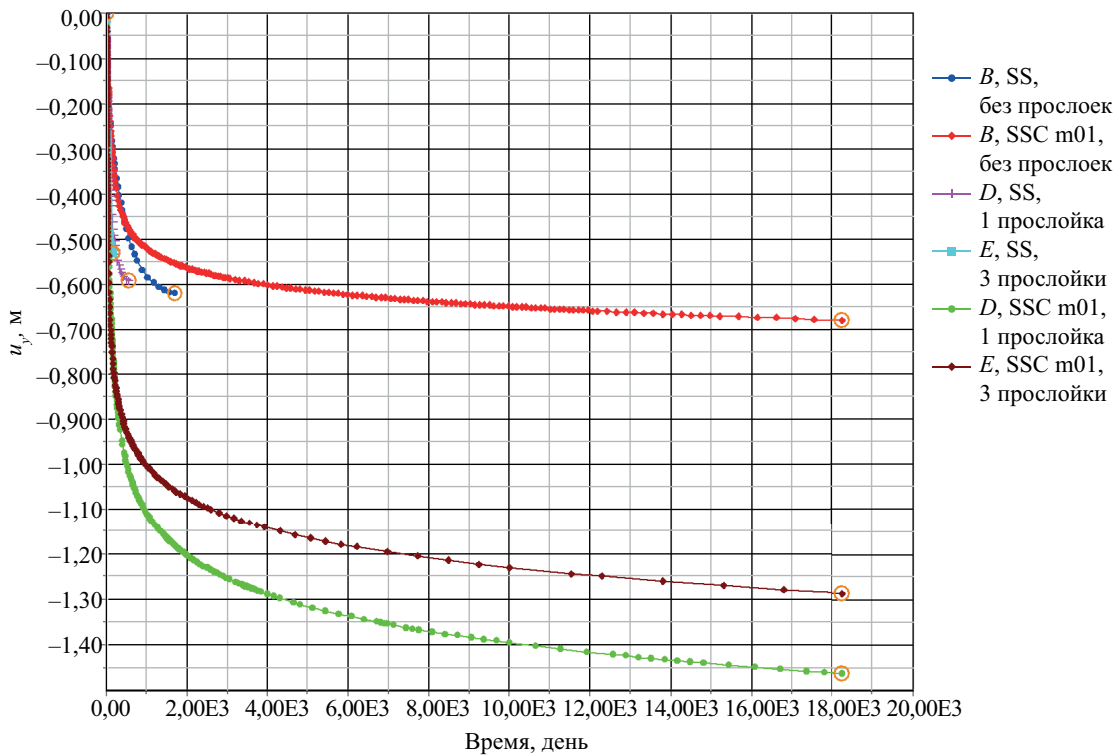


Рис. 4. Кривые «осадка – время» для $R/H = 2,0$ при однородном основании и основании с песчаными прослойками

Анализ и обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют сформулировать инженерный критерий обязательности учета вторичной консолидации: $\mu^* \geq 0,005$ (что эквива-

лентно $C\alpha/C\epsilon \geq 0,10$). Уже при $\mu^* = 0,005$ прирост осадки колеблется от 7 % для тонкого слоя ($R/H = 6,0$) до 198 % для мощного ($R/H = 0,5$); при удвоении μ^* до 0,01 этот же диапазон расширяется до 55–438 %.

Табл. 3. Влияние песчаных прослоев ($R/H = 2,0, k_x/k_y = 1$)

Номер	Условия	Модель	s , мм	Δs , %	$t_{\text{ЕОР}}$, сут.	η
7	Без прослоев	SS	620	–	~1700	–
19	1 прослой	SS	592	–4,5	~540	–
20	3 прослоя	SS	532	–14,2	~150	–
11	Без прослоев	SSC, $\mu^* = 0,01$	1538	–	–	1,00
21	1 прослой	SSC, $\mu^* = 0,01$	1463	–4,9	–	0,95
22	3 прослоя	SSC, $\mu^* = 0,01$	1286	–16,4	–	0,84

Отсюда видно, что для заметной доли реальных грунтовых условий отказ от учета ползучести ведет к существенной недооценке проектных осадок.

Монотонный рост η с уменьшением R/H объясняется длительностью первичной консолидации: в мощном глинистом слое фильтрационное отжатие воды растянуто во времени; и ползучесть, действующая по гипотезе В одновременно с первичной консолидацией, успевает накопить значительные деформации.

Наличие дренирующих прослоев ускоряет первичную консолидацию в 3–11 раз, однако на конечную осадку при наличии ползучести влияет слабо — ее снижение составляет всего 5–16 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ползучесть глинистого грунта способна увеличить конечную осадку плитного фундамента в 1,5–5,4 раза. Максимальное влияние зафиксировано при малых R/H (глубокий слой) и высоких значениях μ^* .

Анизотропия фильтрации ($k_x/k_y = 1–5$) не оказывает существенного влияния на конечную осадку за 50-летний период. Определяющими являются реологические свойства грунта.

Модель SSC воспроизводит эффекты гипотезы В: избыточное поровое давление превышает приложенную нагрузку, а диссипация порового давления замедляется. Эффект наиболее выражен при малых R/H и высоких μ^* .

Песчаные прослои, ускоряя первичную консолидацию в 3–11 раз, снижают итоговую осадку лишь на 5–16 %. Горизонтальные дренирующие слои не оказывают значительного влияния на конечную осадку в основаниях из ползучих грунтов.

Учет вторичной консолидации обязателен при $\mu^* \geq 0,005$ ($C\alpha/Cc \geq 0,10$), характерном для мягких органоминеральных глин, заторфованных грунтов и илов. Рекомендуется применение модели SSC или аналогичных вязкопластических моделей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тер-Мартirosян А.З., Рудь В.В., Шишкина П.В., Варосян А.М. Двумерная консолидация основания фундаментной плиты с учетом анизотропии фильтрационных свойств грунта // Жилищное строительство. 2026. № 4. С. 47–52. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-4-47-52. EDN IWJMXR.

2. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М. : Госстройиздат, 1958. 608 с.

3. Bjerrum L. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings // Géotechnique. 1967. Vol. 17. Issue 2. Pp. 83–118. DOI: 10.1680/geot.1967.17.2.83

4. Mesri G., Godlewski P.M. Time- and Stress-Compressibility Interrelationship // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1977. Vol. 103. Issue 5. Pp. 417–430. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000421

5. Mesri G., Castro A. $C\alpha/Cc$ Concept and K_0 During Secondary Compression // Journal of Geotechnical Engineering. 1987. Vol. 113. Issue 3. Pp. 230–247. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1987)113:3(230)

6. Ladd C.C., Foot R., Ishihara K., Schlosser F.,oulos H.G. Stress-Deformation and Strength Characteristics // 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1977. Vol. 2.

7. Месчан С.Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М. : Недра, 1974. 191 с.

8. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М. : Высшая школа, 1978. 447 с.

9. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 352 с.

10. Тер-Мартirosян А.З., Сидоров В.В., Ермошина Л.Ю. Определение и верификация параметров модели слабого грунта с учетом ползучести // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 6 (117). С. 697–708. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-70

11. Šuklje L. Rheological Aspects of Soil Mechanics. London : Wiley-Interscience, 1969. 571 p.

12. Vermeer P.A., Neher H.P. A Soft Soil Model that Accounts for Creep // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. 1999. Pp. 249–261.

13. Yin J.-H., Graham J. Viscous-Elastic-Plastic Modelling of One-Dimensional Time-Dependent Behaviour of Clays // Canadian Geotechnical Journal. 1989. Vol. 26. Issue 2. Pp. 199–209. DOI: 10.1139/t89-029

14. Leoni M., Karstunen M., Vermeer P.A. Anisotropic Creep Model for Soft Soils // Géotechnique. 2008. Vol. 58. Issue 3. Pp. 215–226. DOI: 10.1680/geot.2008.58.3.215

15. Leroueil S. The Isotache Approach. Where Are We 50 Years After Its Development by Professor Šuklje? // Proc. 13th Danube-European Conf. on SMGE. Ljubljana, 2006. Vol. 1. Pp. 55–88.

16. Degago S.A., Nordal S., Grimstad G., Jostad H.P. Analyses Relative to the Uniqueness of the End-of-Primary Void Ratio–Effective Stress Relationship // Canadian Geotechnical Journal. 2011. Vol. 48. Issue 8. Pp. 1268–1271.

17. Bhartiya P., Basu D., Chakraborty T. Time-Dependent Response of Rectangular Piled Rafts in Clayey Soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2022. Vol. 148. Issue 5. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002758

18. Chen Z., Li P., Wu P., Yin J. Song D. Study of the one-dimensional consolidation and creep of clays with different thicknesses using different hypotheses and three elastic visco-plastic models // Acta Geotechnica. 2024. Vol. 19. Issue 11. Pp. 7329–7347. DOI: 10.1007/s11440-024-02405-w

19. Potts D.M., Zdravkovic L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Volume One — Theory. London : Thomas Telford, 1999. 440 p. DOI: 10.1680/feaiget.27534

20. Biot M.A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation // Journal of Applied Physics. 1941. Vol. 12. Issue 2. Pp. 155–164. DOI: 10.1063/1.1712-886

Поступила в редакцию 13 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, доцент кафедры геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9467-5034, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Любовь Юрьевна Романенко — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Виктория Владимировна Рудь — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 992433, Scopus: 58295443600, ResearcherID: MCK-3917-2025, ORCID: 0000-0003-0596-336X; victoriadll@yandex.ru;

Полина Владимировна Шишкина — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1318761, Scopus: 58295443600, ORCID: 0009-0003-4531-4249; pshishkina638@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The problem of predicting long-term settlement of foundations on weak clay soils has remained a key issue throughout the history of soil mechanics. In a previously published paper by the authors [1], a parametric study was conducted into the influence of two-dimensional filtration and permeability anisotropy on the rate of primary consolidation of slab foundations. It was shown that K. Terzaghi's classical one-dimensional theory [2], for small R/H ratios, can overestimate the calculated consolidation time by more than a factor of two. Nevertheless, the model considered did not take into account the rheological properties of the soil, and the settlement prediction was limited to primary filtration consolidation.

Meanwhile, in the case of natural soft clays, the deformation of the soil skeleton does not cease once the ex-

cess pore pressure has been fully dissipated. This phenomenon, known as secondary consolidation or creep, was first systematically described by L. Bjerrum [3], who proposed the concept of “instantaneous” and “delayed” compression. A quantitative characterization of the creep intensity via the C_a/C_c ratio was established by G. Mesri and P.M. Godlevski [4], who found that for mineral clays, C_a/C_c ranges from 0.02 to 0.06, whilst for organic soils it increases to 0.10–0.20. This concept was further developed by G. Mesri and A. Castro [5].

The central point of debate in the theory of secondary consolidation remains the timing of the onset of creep relative to primary consolidation. S.S. Ladd et al. [6] formulated two alternative positions: hypothesis *A* (creep begins after the completion of primary consolidation) and hypothesis *B*, supported by L. Bjerrum [3], which allows for the simultaneous occurrence of creep and filtra-

tion consolidation. In Russian scientific literature, similar ideas were developed in the works of S.R. Meschyan [7], S.S. Vyalov [8] and Yu.K. Zaretsky [9].

A methodology has been developed for verifying the parameters of the SSC model by comparing numerical simulations of compression tests in Plaxis with laboratory data [10].

A numerical implementation of hypothesis *B* was proposed by L. Shuknecht [11] using the isotach concept. On this basis, P.A. Vermeer and H.P. Neer [12] developed the Soft Soil Creep (SSC) model, which has become one of the most widely used constitutive models for calculating the creep behaviour of soft soils within the finite element method (FEM). In parallel, J.-H. Yin and J. Graham [13] proposed a visco-elastic-plastic model based on the hypothesis of M. Leoni et al. [14], and developed an anisotropic version of the SSC model. An overview of the isotach approach is presented by S. Lerouel [15]. S.A. Degago et al. [16] demonstrated that the arguments put forward by proponents of hypothesis *A* may have contained a systematic error of interpretation.

The practical application of creep models to foundation engineering problems has been investigated in a number of studies. P. Bhartiya et al. [17] carried out a numerical analysis of pile-slab foundations on clayey soils and demonstrated the significant influence of viscoplastic properties on load redistribution. J. Yuan et al. [18] compared hypotheses *A* and *B* using three EVP models, confirming the superiority of hypothesis *B* for predicting settlements in thick layers. The FEM methodology for fil-

tration consolidation problems is set out by D.M. Potts and L. Zdravkovich [19] based on the theory of M.A. Bio [20].

The practical significance of this problem is heightened by the fact that circular foundation slabs of considerable diameter are widely used in the oil and gas industry as bases for vertical storage tanks, gas holders and column-type equipment. The sites of such facilities are often located in coastal and floodplain areas with distinct soil rheological properties. Failure to account for creep can lead to a significant underestimation of long-term settlement and compromise the operational suitability of the structures.

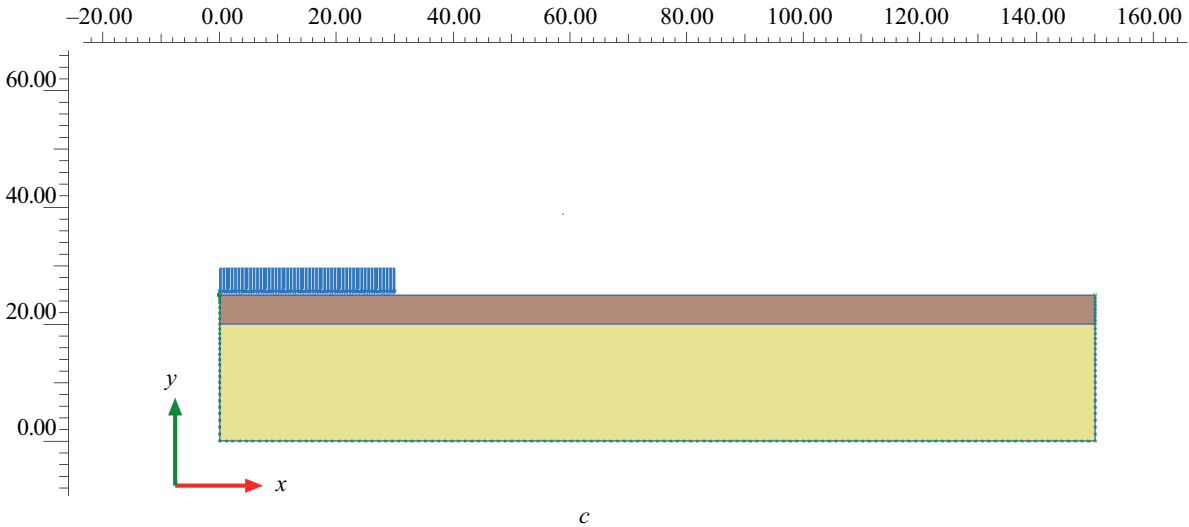
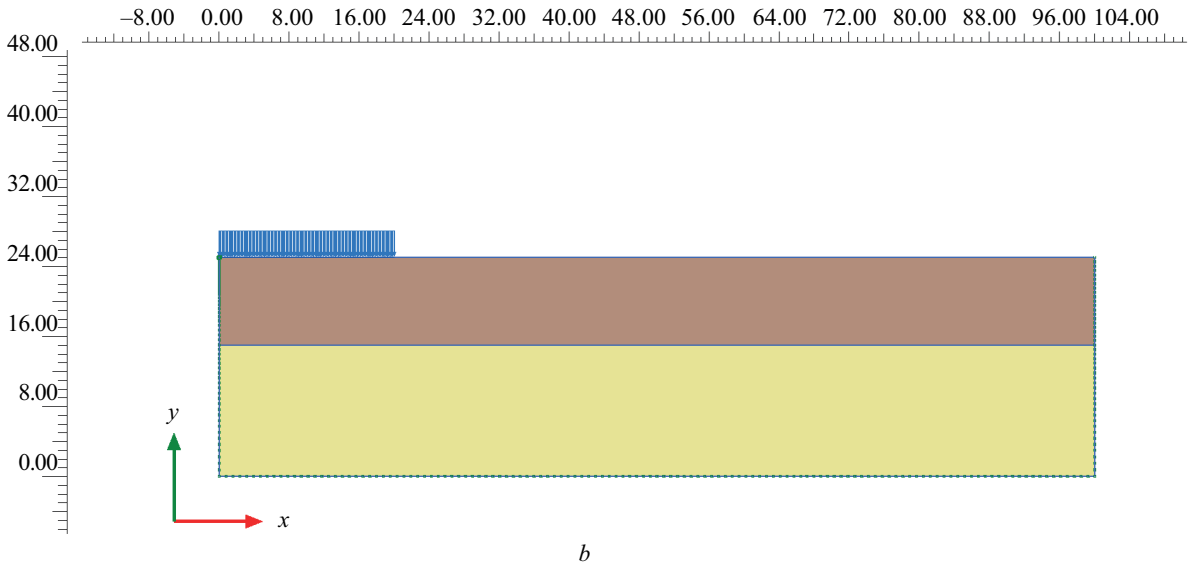
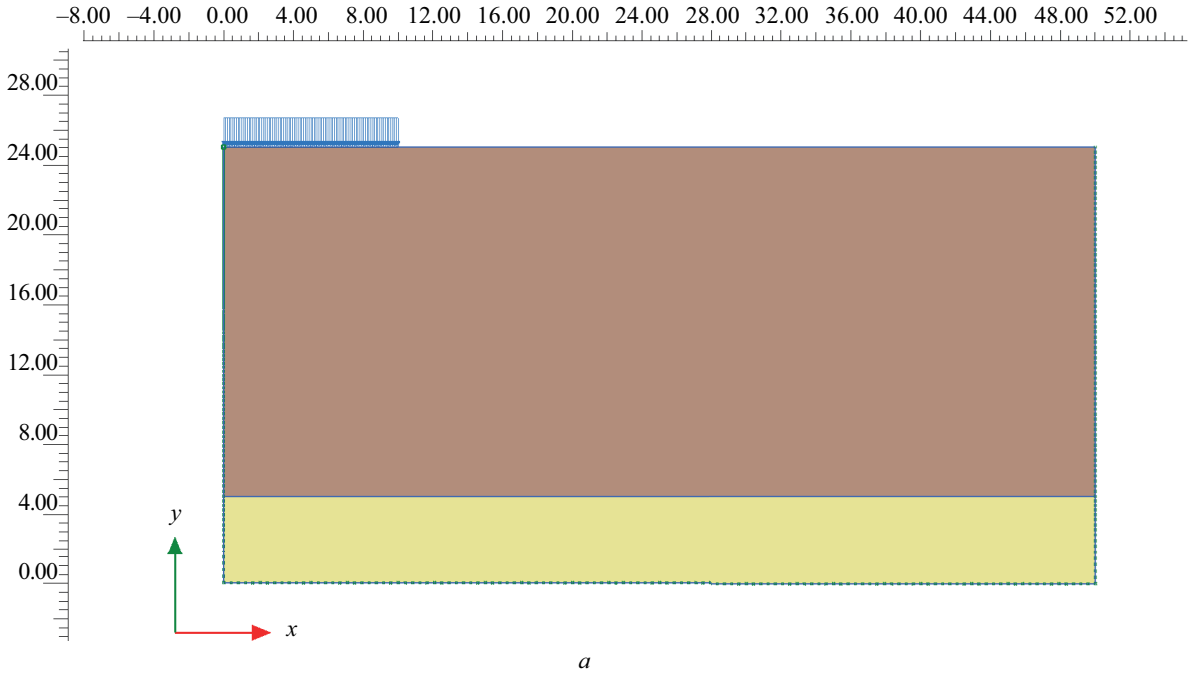
Despite a considerable body of theoretical research, no systematic parametric study has been presented in the literature that allows for a quantitative assessment of the contribution of secondary consolidation to the settlement of large-area slab foundations, whilst varying key geometric and rheological factors. The aim of this study is to fill this gap.

MATERIALS AND METHODS

The computational experiment was carried out using the Plaxis 2D software package. In an axisymmetric configuration, a circular rigid slab foundation resting on a two-layer subgrade was considered: an upper clay layer of thickness *H* and an underlying sand layer; the total height of the analysis domain *y*_{max} was taken as 25 m. The slab was modelled as a Plate finite element with stiffnesses *EA* = 3 · 10⁷ kN/m and *EI* = 2.5 · 10⁶ kN·m²/m; a uniform load of *q* = 100 kPa was applied to the slab.

Table 1. Matrix of design options

Number	Geometry	<i>R</i> , m	<i>H</i> , m	<i>R/H</i>	<i>k_x/k_y</i>	Model	μ*
1	<i>A</i>	10	20	0.5	1	SS	–
2	<i>A</i>	10	20	0.5	5	SS	–
3	<i>A</i>	10	20	0.5	1	SSC	0.005
4	<i>A</i>	10	20	0.5	5	SSC	0.005
5	<i>A</i>	10	20	0.5	1	SSC	0.01
6	<i>A</i>	10	20	0.5	5	SSC	0.01
7	<i>B</i>	20	10	2.0	1	SS	–
8	<i>B</i>	20	10	2.0	5	SS	–
9	<i>B</i>	20	10	2.0	1	SSC	0.005
10	<i>B</i>	20	10	2.0	5	SSC	0.005
11	<i>B</i>	20	10	2.0	1	SSC	0.01
12	<i>B</i>	20	10	2.0	5	SSC	0.01
13	<i>C</i>	30	5	6.0	1	SS	–
14	<i>C</i>	30	5	6.0	5	SS	–
15	<i>C</i>	30	5	6.0	1	SSC	0.005
16	<i>C</i>	30	5	6.0	5	SSC	0.005
17	<i>C</i>	30	5	6.0	1	SSC	0.01
18	<i>C</i>	30	5	6.0	5	SSC	0.01
19	<i>D</i> (1 layer)	20	10	2.0	1	SS	–
20	<i>E</i> (3 layers)	20	10	2.0	1	SS	–
21	<i>D</i> (1 layer)	20	10	2.0	1	SSC	0.01
22	<i>E</i> (3 layers)	20	10	2.0	1	SSC	0.01



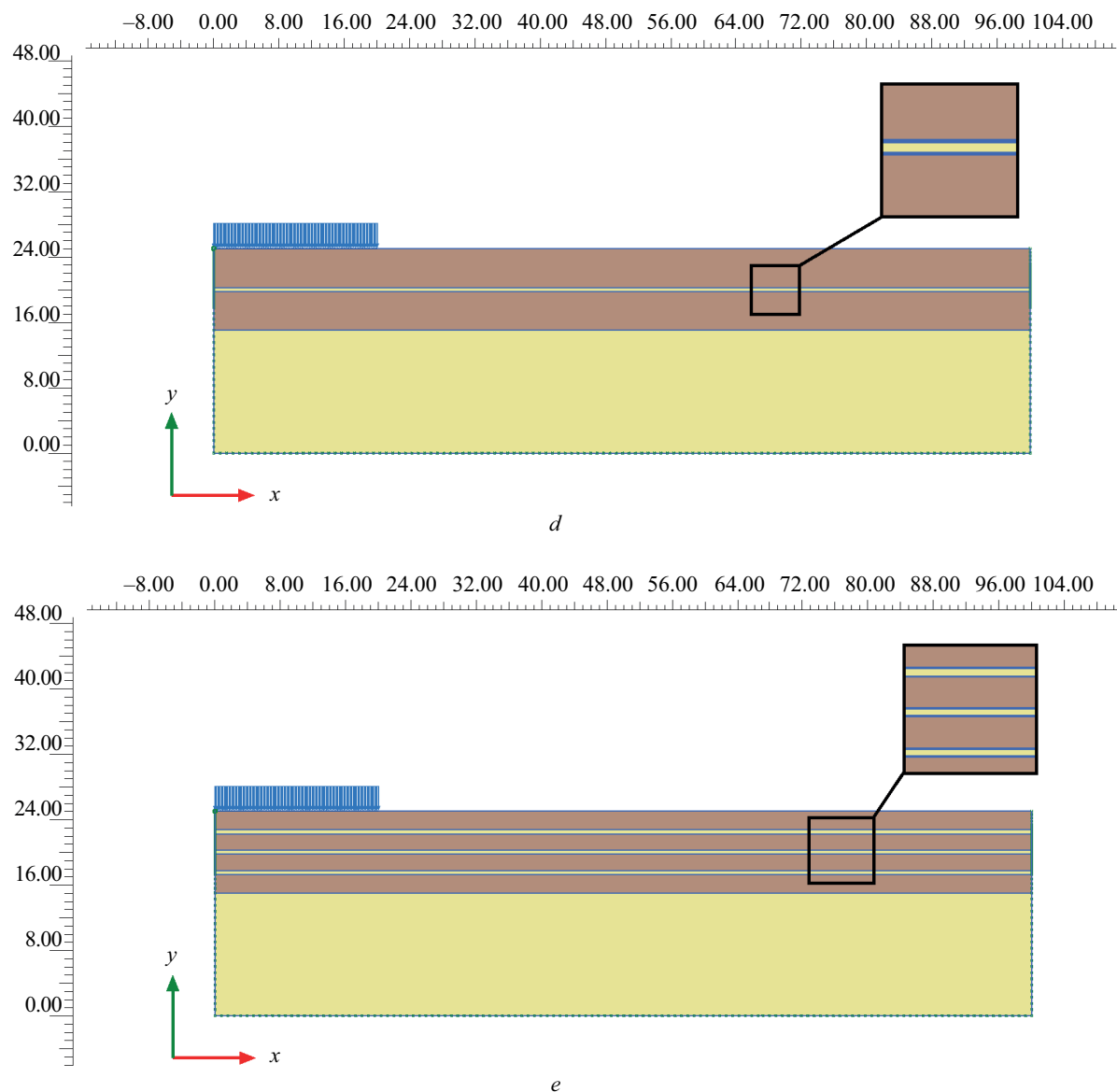


Fig. 1. Design diagrams: *a* — $R/H = 0.5$; *b* — $R/H = 2.0$; *c* — $R/H = 6.0$; *d* — $R/H = 2.0$, one sand layer; *e* — $R/H = 2.0$, three sand layers

Unlike the study in [1], which considered only primary consolidation, this study applies two soil models in parallel to the clay layer: Soft Soil (SS) and Soft Soil Creep (SSC). This paired analysis allows the contribution of creep to be isolated in its pure form by comparing the results based on the same set of input data. The following parameters are adopted for the clay layer: $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda^* = 0.05$; $\kappa^* = 0.01$; $c' = 20 \text{ kPa}$; $\varphi' = 22^\circ$; $v'_{ur} = 0.15$; $e_0 = 0.8$; $k_y = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/day}$.

For the sandy subgrade, the Mohr – Coulomb model is adopted in a drained configuration with the following parameters: $E' = 40 \text{ MPa}$; $v' = 0.3$; $c' = 1 \text{ kPa}$; $\varphi' = 35^\circ$; $k = 1 \text{ m/day}$. The groundwater level is assumed to be at ground level.

The calculation was carried out in two stages: in the first stage (Plastic, Staged construction), the load was applied instantaneously, with deformations due to self-

weight reset to zero; in the second stage (Consolidation, Staged construction), the combined process of filtration consolidation and creep was modelled over a time horizon of 18,250 days, corresponding to 50 years. This fixed time interval was chosen deliberately: Plaxis's automatic criterion based on minimum pore pressure terminates the calculation at the boundary of primary consolidation and does not allow the further development of secondary deformations to be tracked.

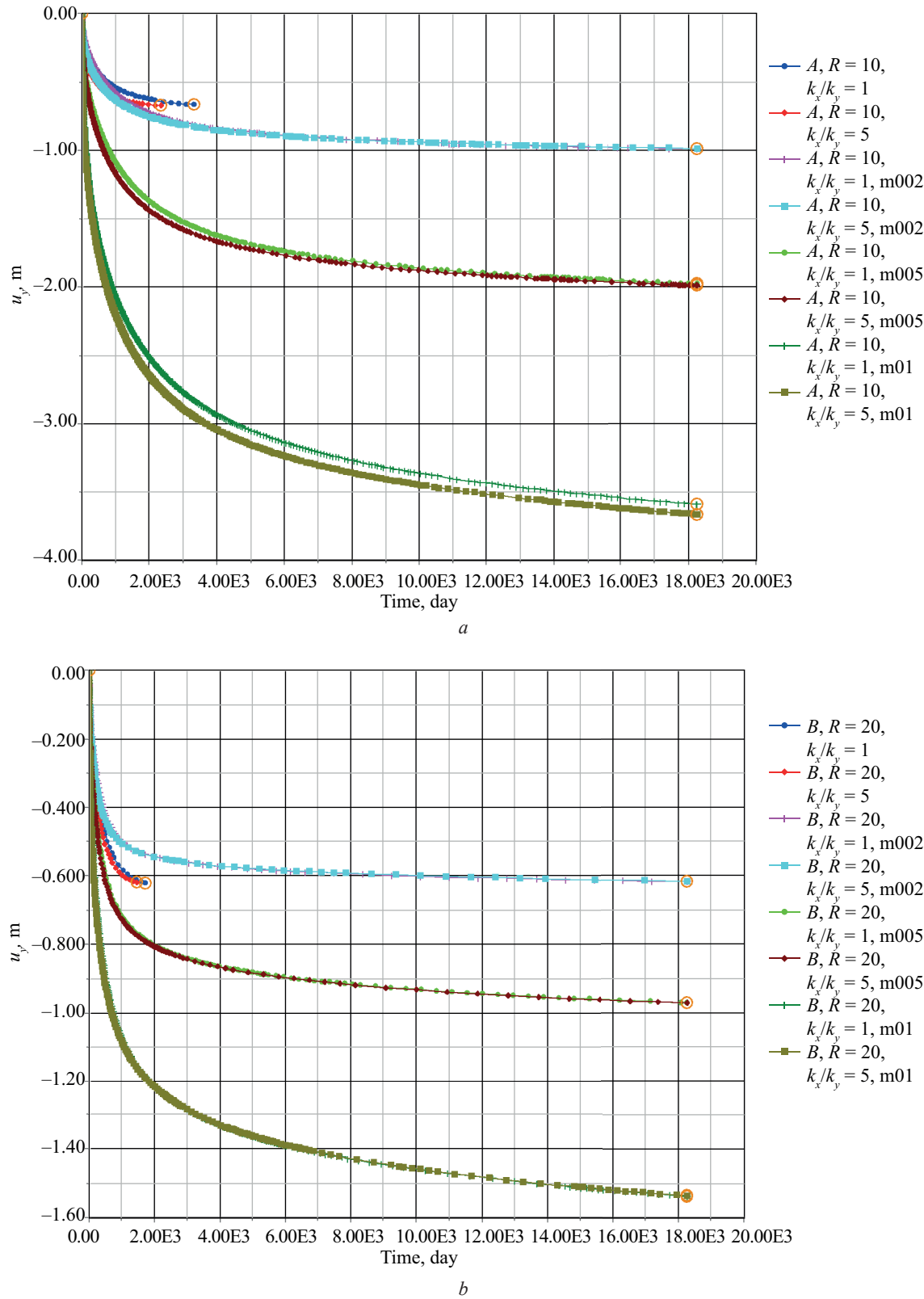
The numerical study comprises 22 variants and is structured according to a matrix scheme, with four factors varied: the ratio of the plate radius to the thickness of the clay layer ($R/H = 0.5$; 2.0 and 6.0), the filtration anisotropy coefficient ($k_x/k_y = 1$ and 5), the modified creep index μ^* (values 0; 0.005 and 0.01; a value of zero corresponds to the SS model) and the presence of horizontal sandy interlayers, each 0.5 m thick —

either a single interlayer in the middle of the layer or three evenly distributed interlayers (geometry *B*). The selected range $\mu^* = 0.005\text{--}0.01$ corresponds to a $C\alpha/C_c$ ratio of $\approx 0.10\text{--}0.20$, characteristic of organo-mineral clays and peaty soils [4, 5]. The complete matrix of variants is summarized in Table 1, and the corresponding calculation schemes are shown in Fig. 1.

RESEARCH RESULTS

Results of numerical modelling

Fig. 2 shows graphs of the time-dependent settlement of the centre of the slab for the three *R/H* ratios studied, where $\mu^* = 0$ (SS), 0.005 and 0.01 (SSC), and for two values of k_x/k_y .



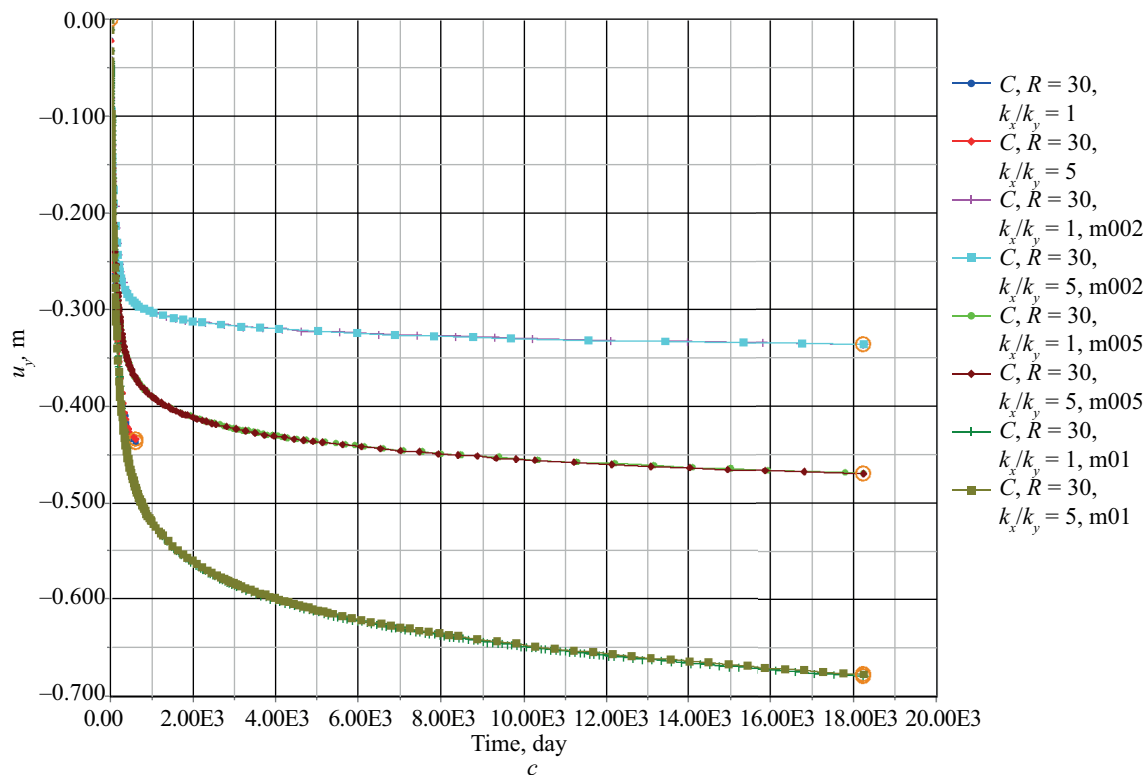


Fig. 2. “Centre of plate deflection versus time” curves for: *a* — $R/H = 0.5$ (geometry *A*); *b* — $R/H = 2.0$ (geometry *B*); *c* — $R/H = 6.0$ (geometry *C*)

Table 2. Results of the parametric study (final sedimentation at $t = 50$ years)

Number	R/H	k_x/k_y	s_{ss} , mm	$s(\mu^* = 0.005)$, mm	$s(\mu^* = 0.01)$, mm	$\Delta s(0.005)$, %	$\Delta s(0.01)$, %	$\eta(0.01)$
1	0.5	1	668	1,990	3,592	198	438	5.38
2	0.5	5	673	1,990	3,664	196	444	5.44
3	2.0	1	620	972	1,538	57	148	2.48
4	2.0	5	618	972	1,536	57	148	2.49
5	6.0	1	437	469	679	7	55	1.55
6	6.0	5	433	470	677	9	56	1.56

The behaviour of the curves for all geometries reveals a consistent pattern: the SS variants reach a steady-state value for settlement once pore pressure dissipation has ceased, whilst the SSC curves increase monotonically throughout the entire 50-year simulation period. The rate of secondary consolidation increases in proportion to μ^* , which is consistent with theoretical findings [12, 15].

The numerical values of the final settlements are summarised in Table 2. For each scenario, the relative increase $\Delta s = (s_{SSC} - s_{SS})/s_{SS} \cdot 100\%$ and the dimensionless settlement increase coefficient $\eta = s_{SSC}/s_{SS}$ have been calculated.

An analysis of Table 2 shows that the extent of the influence of creep is largely determined by the geometry

of the design cross-section. For a deep layer ($R/H = 0.5$, $H = 20$ m), the coefficient η at $\mu^* = 0.01$ reaches 5.4 — creep increases the settlement more than fivefold. For intermediate geometry ($R/H = 2.0$), $\eta = 2.5$, and for a thin layer ($R/H = 6.0$), $\eta = 1.6$.

The physical reason for this relationship is linked to the timescale of primary consolidation. Where the thickness of the compressed formation is large, the dissipation of pore pressure takes many years, and creep occurring in parallel (hypothesis *B*) accumulates additional deformations. For short filtration paths (high R/H ratios), primary consolidation is completed rapidly, and the accumulation of secondary deformations is limited.

The effect of permeability anisotropy on the total settlement over a 50-year time horizon proved to be neg-

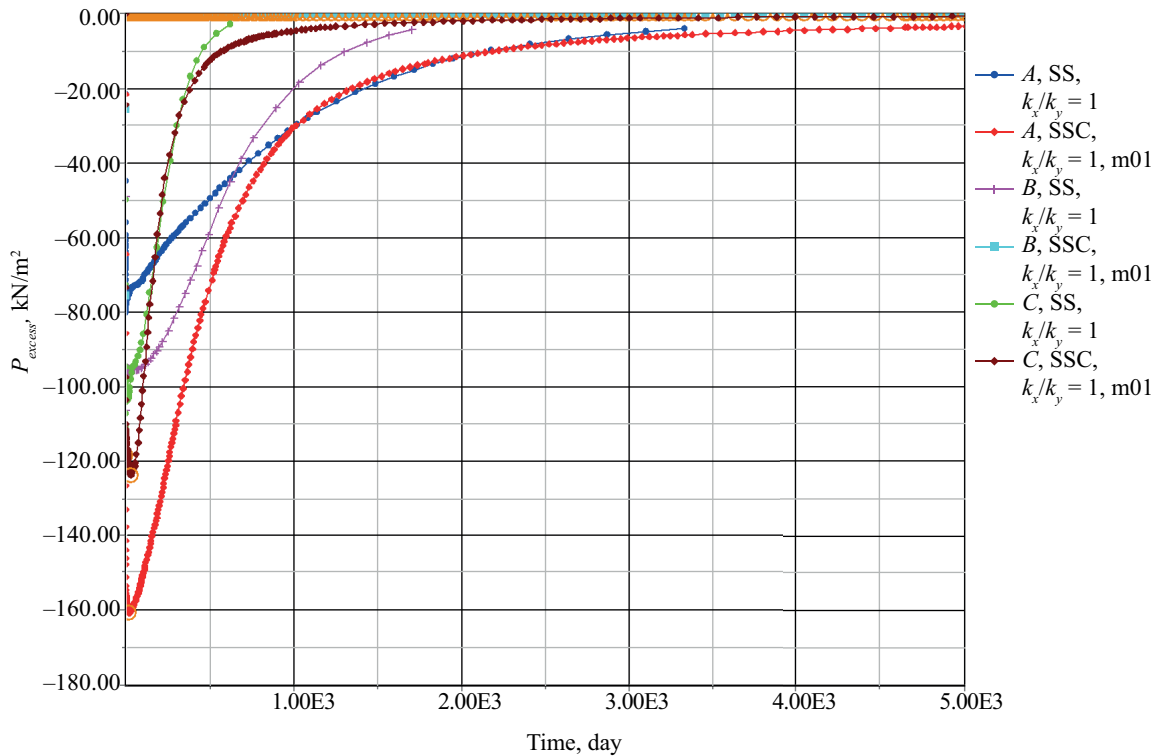


Fig. 3. Dissipation of excess pore pressure for geometries *A*, *B* and *C*: solid lines — SS; dashed lines — SSC ($\mu^* = 0.01$), $k_x/k_y = 1$

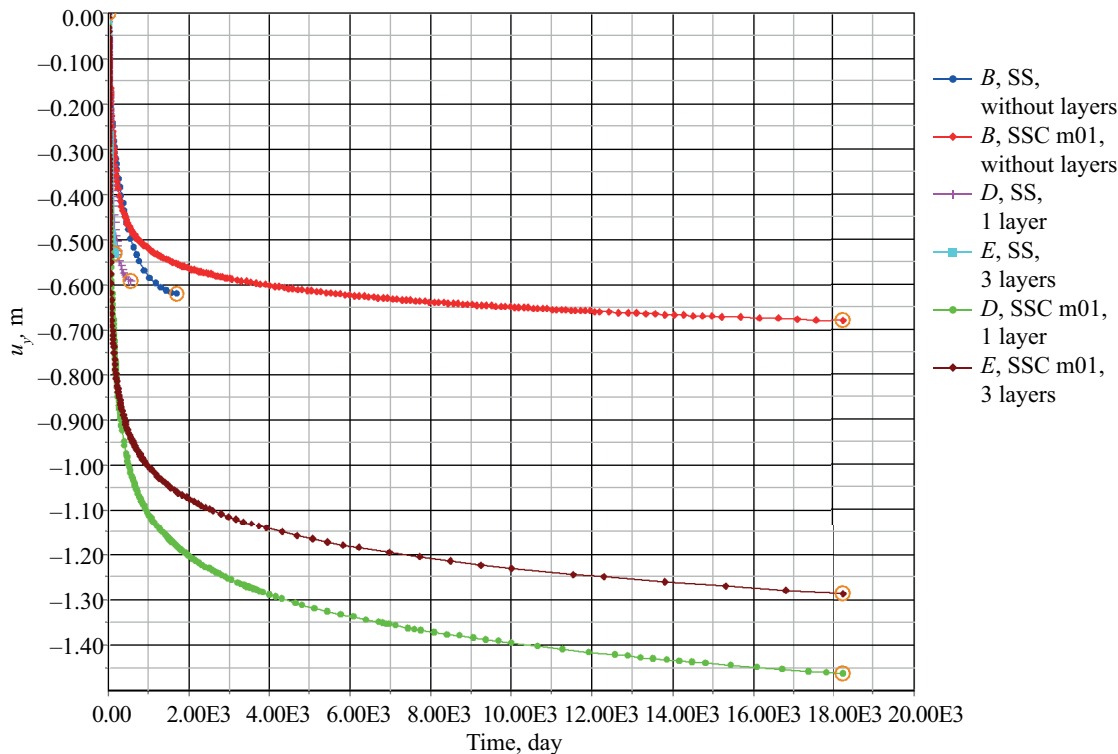


Fig. 4. “Settlement – time” curves for $R/H = 2.0$ for a homogeneous subgrade and a subgrade with sandy layers

ligible: the difference between the $k_x/k_y = 1$ и $k_x/k_y = 5$ scenarios does not exceed 2 % for all geometries. Drainage conditions control only the rate of primary consolidation, whilst the final settlement, in the presence of creep, is determined by the rheological properties of the soil.

Fig. 3 shows the curves of excess pore pressure dissipation at the centre of the clay layer. It is also worth noting that a notable feature of the results obtained is that the initial value of P_{excess} exceeds the applied load ($q = 100$ kPa) in the calculations using

Table 3. Effect of sand layers ($R/H = 2.0$, $k_x/k_y = 1$)

Number	Conditions	Model	s , mm	Δs , %	t_{EOP} , day	η
7	Without layers	SS	620	–	~1,700	–
19	1 layer	SS	592	–4.5	~540	–
20	3 layers	SS	532	–14.2	~150	–
11	Without layers	SSC, $\mu^* = 0.01$	1,538	–	–	1.00
21	1 layer	SSC, $\mu^* = 0.01$	1,463	–4.9	–	0.95
22	3 layers	SSC, $\mu^* = 0.01$	1,286	–16.4	–	0.84

the SSC model. At $R/H = 0.5$ and $\mu^* = 0.01$, the peak pore pressure at the centre of the layer is of the order of 160 kPa. This effect reflects the SSC mechanism: viscoelastic deformation of the skeleton tends to outpace the rate of filtration-induced water discharge, generating an additional increase in pore pressure, i.e. an illustration of hypothesis *B* [3, 6, 17]. For a thin layer ($R/H = 6.0$), the excess pore pressure dissipates over ~500 days even at $\mu^* = 0.01$, whilst precipitation continues to accumulate over decades.

The results of the calculations for the variants with sand layers (No. 19–22) are compared with those for a homogeneous subgrade in Table 3 and Fig. 4.

The introduction of sand layers significantly accelerates initial consolidation: the time to reach a steady state, according to the SS model, is reduced from ~1,700 days to ~540 days (one layer) and to ~150 days (three layers). The final settlement of the SS is reduced by 4.5 and 14.2 % respectively.

For the SSC model with $\mu^* = 0.01$, the settlement is 1,463 mm (1 layer) and 1,286 mm (3 layers) instead of 1,538 mm with a homogeneous subgrade. Key conclusion: the “tail” of creep persists — the rate of increase in secondary strains is virtually independent of the presence of drainage elements.

Analysis and discussion of the results

The results obtained allow us to formulate an engineering criterion for the necessity of taking secondary consolidation into account: $\mu^* \geq 0.005$ (which is equivalent to $Ca/Cc \geq 0.10$). Even at $\mu^* = 0.005$, the increase in settlement ranges from 7 % for a thin layer ($R/H = 6.0$) to 198 per cent for a thick layer ($R/H = 0.5$); when μ^* is doubled to 0.01, this range expands to 55–438 %. It is evident from this that, for a significant proportion of real-world soil conditions, failing to take creep into

account leads to a substantial underestimation of design settlements.

The monotonous increase in η as R/H decreases is explained by the duration of primary consolidation: in a thick clay layer, the filtration of water is a protracted process; and creep, which, according to hypothesis *B*, occurs simultaneously with primary consolidation, has time to accumulate significant deformations.

The presence of drainage layers accelerates primary consolidation by a factor of 3–11, but has little effect on the final settlement in the presence of creep — the reduction is only 5–16 %.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The creep behaviour of clayey soil can increase the final settlement of a slab foundation by a factor of 1.5–5.4. The greatest effect has been observed at low R/H ratios (deep layer) and high values of μ^* .

Filtration anisotropy ($k_x/k_y = 1-5$) has no significant effect on the final settlement over a 50-year period. The determining factors are the soil’s rheological properties.

The SSC model reproduces the effects of hypothesis *B*: the excess pore pressure exceeds the applied load, and the dissipation of pore pressure is slowed down. This effect is most pronounced at low R/H ratios and high μ^* values.

Sand interlayers, whilst accelerating initial consolidation by a factor of 3–11, reduce the final settlement by only 5–16 %. Horizontal drainage layers have no significant effect on the final settlement of foundations on creep soils.

Consideration of secondary consolidation is mandatory when $\mu^* \geq 0.005$ ($Ca/Cc \geq 0.10$), which is characteristic of soft organomineral clays, peaty soils, and silts. The use of the Soft Soil Creep (SSC) model or similar viscoplastic models is recommended.

REFERENCES

1. Ter-Martirosyan A.Z., Rud V.V., Shishkina P.V., Varosyan A.M. Two-dimensional consolidation of raft foundation subsoil considering soil permeability anisotrop. *Housing Construction*. 2026; 4:47-52. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-4-47-52. EDN IWJMXR. (rus.).

2. Terzaghi K., Peck R. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Moscow, Gosstroyizdat, 1958; 608. (rus.).

3. Bjerrum L. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Géotechnique*. 1967; 17(2):83-118. DOI: 10.1680/geot.1967.17.2.83

4. Mesri G., Godlewski P.M. Time- and Stress-Compressibility Interrelationship. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1977; 103(5):417-430. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000421

5. Mesri G., Castro A. *Ca/Cc Concept and K0 During Secondary Compression*. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987; 113(3):230-247. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1987)113:3(230)
6. Ladd C.C., Foot R., Ishihara K., Schlosser F., Poulos H.G. Stress-Deformation and Strength Characteristics. *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1977; 2.
7. Meshchyan S.R. *Mechanical Properties of Soils*. Moscow, Nedra, 1974; 191. (rus.).
8. Vyalov S.S. *Rheological Fundamentals of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1978; 447. (rus.).
9. Zaretskiy Yu.K. *Viscoplasticity of Soils and Structural Design*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 352. (rus.).
10. Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V., Ermoshina L.Yu. Determination and verification of parameters of the soft soil model with account for creep. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(6):(117):697-708. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708 (rus.).
11. Šuklje L. *Rheological Aspects of Soil Mechanics*. London, Wiley-Interscience, 1969; 571.
12. Vermeer P.A., Neher H.P. A Soft Soil Model that Accounts for Creep. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. 1999; 249-261.
13. Yin J.-H., Graham J. Viscous-Elastic-Plastic Modelling of One-Dimensional Time-Dependent Behaviour of Clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 1989; 26(2):199-209. DOI: 10.1139/t89-029
14. Leoni M., Karstunen M., Vermeer P.A. Anisotropic Creep Model for Soft Soils. *Géotechnique*. 2008; 58(3):215-226. DOI: 10.1680/geot.2008.58.3.215
15. Leroueil S. The Isotache Approach. Where Are We 50 Years After Its Development by Professor Šuklje? *Proc. 13th Danube-European Conf. on SMGE*. Ljubljana, 2006; 1:55-88.
16. Degago S.A., Nordal S., Grimstad G., Jostad H.P. Analyses Relative to the Uniqueness of the End-of-Primary Void Ratio–Effective Stress Relationship. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011; 48(8):1268-1271.
17. Bhartiya P., Basu D., Chakraborty T. Time-Dependent Response of Rectangular Piled Rafts in Clayey Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2022; 148(5). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002758
18. Chen Z., Li P., Wu P., Yin J. Song D. Study of the one-dimensional consolidation and creep of clays with different thicknesses using different hypotheses and three elastic visco-plastic models. *Acta Geotechnica*. 2024; 19(11):7329-7347. DOI: 10.1007/s11440-024-02405-w
19. Potts D.M., Zdravkovic L. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Volume One — Theory*. London, Thomas Telford, 1999; 440. DOI: 10.1680/feaiget.27534
20. Biot M.A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*. 1941; 12(2):155-164. DOI: 10.1063/1.1712886

Received April 13, 2026.

Adopted in revised form on April 29, 2026.

Approved for publication on May 3, 2026.

BIONOTES: **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5034, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Lyubov Yu. Romanenko — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Victoria V. Rud — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 992433, Scopus: 58295443600, ResearcherID: MCK-3917-2025, ORCID: 0000-0003-0596-336X; victoriadll@yandex.ru;

Polina V. Shishkina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1318761, Scopus: 58295443600, ORCID: 0009-0003-4531-4249; pshishkina638@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

Исследования теплофизических параметров модульных фасадов

Кирилл Павлович Зубарев^{1,2,3}, Вячеслав Владимирович Казунин³,
Виктор Львович Добшиц³, Левон Гарегинович Гаранян³,
Михаил Валерьевич Емельянов¹, Мария Антоновна Слизова¹

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

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

³ Российский университет дружбы народов; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведен обзор литературы по подходам к разработке и испытаниям энергоэффективных модульных фасадных систем. Отмечено, что разработка методов проектирования модульных фасадов особенно актуальна в условиях экстремального климата, где теплотехнические характеристики являются основным параметром для улучшения.

Материалы и методы. Обзор литературы проведен с применением как российских, так и зарубежных источников. Использовались российские статьи из списка ВАК. Описывались зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных (MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink и Scopus).

Результаты. Рассмотрены исследования J. Li и соавт. по выбору теплоизоляционных материалов, работа A. Sciotti и соавт. по оптимизации узлов соединения и состава конструкционных смесей, а также работа X. Zou и соавт. о конструктивных решениях соединений, обеспечивающих сохранение заводской отделки. Для экспериментальной верификации S.P.B. Sousa и соавт. описали методы испытаний в динамических лабораторных условиях, а статья Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. посвящена частично моделируемым натурным условиям.

Выводы. При выборе теплоизоляционных материалов наиболее эффективными считаются вакуумные изоляционные панели, они помогают снизить теплопотери примерно на 73–76 %, а также аэрогелевые покрытия с экономией около 43–49 %. В проектировании соединений модульных фасадов придумали использовать систему внутренних стяжек. Кроме того, как эффективное конструктивное решение, применяют S-образные соединительные профили, которые уменьшают перепад температуры между пенополистирольными панелями с 8 до 1,5 К. Для проверки модульных фасадных систем лучше всего сочетать лабораторные методы с натурными испытаниями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульное строительство, теплоизоляционные материалы, мостики холода, энергоэффективность, математическое моделирование, температурное поле, теплоперенос, эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зубарев К.П., Казунин В.В., Добшиц В.Л., Гаранян Л.Г., Емельянов М.В., Слизова М.А. Исследования теплофизических параметров модульных фасадов // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.5

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Павлович Зубарев, zubarevki93@mail.ru.

Studies of thermophysical parameters of modular facades

Kirill P. Zubarev^{1,2,3}, Vyacheslav V. Kazunin³, Victor L. Dobshits³, Levon G. Garanyan³,
Mikhail V. Emelianov¹, Maria A. Slizova¹

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

² Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture
and Construction Science (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

³ RUDN University; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A literature review of approaches to the development and testing of energy-efficient modular facade systems is presented. It is noted that methods for designing modular facades are particularly relevant in extreme climates, where thermal performance is the principal parameter to be improved.

Materials and methods. The literature review was conducted using both Russian and international sources. The literature review included Russian articles published in journals listed by the Higher Attestation Commission (VAK list), as well as in-

ternational publications indexed in major bibliographic databases and available through MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink, and Scopus.

Results. The studies by J. Li et al. on the selection of thermal insulation materials, the work by A. Sciotti et al. on the optimization of connection joints and the composition of structural mixtures, and the work by X. Zou et al. on structural connection solutions that preserve factory-applied finishing were reviewed. For experimental verification, S.P.B. Sousa et al. described test methods under dynamic laboratory conditions, while the paper by Z. Azkorra-Larrinaga et al. addressed partially simulated full-scale conditions.

Conclusions. Vacuum insulation panels are considered the most effective thermal insulation materials, reducing heat losses by approximately 73–76 %, while aerogel coatings provide savings of about 43–49 %. A system of internal ties has been proposed for the design of modular facade connections. In addition, S-shaped connecting profiles are used as an effective structural solution, reducing the temperature difference between expanded polystyrene panels from 8 to 1.5 K. Modular facade systems are best verified by combining laboratory methods with full-scale tests.

KEYWORDS: modular construction, thermal insulation materials, thermal bridges, energy efficiency, mathematical modeling, temperature field, heat transfer, experiment

FOR CITATION: Zubarev K.P., Kazunin V.V., Dobshits V.L., Garanyan L.G., Emelianov M.V., Slizova M.A. Studies of thermo-physical parameters of modular facades. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):5. URL: <http://nsj-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.5

Corresponding author: Kirill P. Zubarev, zubarevkill93@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство с применением технологий модульных фасадов имеет преимущества в сравнении с классическим возведением здания [1, 2]. Время постройки сооружений снижается в связи с использованием фасадов или целых жилых блоков, предварительно собранных на заводе [3, 4]. Экономия возникает вследствие сокращения времени, так как существенные затраты на стройплощадке — это заработная плата рабочих [5, 6]. Модульные фасады позволяют проводить экспериментальные исследования в лаборатории на готовом элементе здания [7, 8]. Здания, собранные из модульных конструкций, в ряде случаев могут быть более экологичными и энергоэффективными [9, 10], так как заводская сборка дает возможность использовать материалы, которые практически не применяются на стройплощадке из-за сложностей монтажа [11, 12]. Также заводская сборка позволяет повысить качество установки таких элементов ограждающей конструкции, как теплоизоляция и воздушная прослойка [13, 14]. Экологичность модульных фасадов обоснована выбором материалов природного происхождения [15, 16] и материалов с возможностью повторного использования [17, 18], снижением углеродного следа [19, 20], возможностью минимизировать отходы при монтаже [21, 22]. Дополнительным преимуществом является заводской контроль качества, снижающий риск дефектов [23].

Теплотехнические характеристики строительных материалов влияют на энергопотребление здания [24]. Снижение теплопроводности ограждающих конструкций уменьшает потери тепла зимой и предотвращает перегрев летом, что напрямую уменьшает нагрузку на системы отопления, вентиляции и кондиционирования [25, 26]. Изменение состава основных строительных материалов, применение различных конструктивных решений модулей — одна из приоритетных задач в модульном строительстве

[27, 28]. Для экстремального климата, например арктического, требуются инновационные подходы [29].

Большая часть существующих исследований по модульным фасадам приходится на активные модули [30, 31], значительно меньше умных [32, 33], зеленых [34, 35] и пассивных [36, 37] (классификация предложена в комплексном обзоре модульных фасадов [38]). Также почти все исследования проведены для умеренного климата [39, 40]. По сравнению с 2023 г. в 2025 г. заинтересованность ученых-строителей в модульных фасадах возросла [41, 42]. Экстремальные условия требуют инновационных подходов к энергоэффективному модульному строительству [43]. Срок окупаемости модулей, соответствующих требуемым стандартам отопления, в таких условиях превышает срок службы здания [44].

При создании модульных конструкций важно учитывать мостики холода как в самой конструкции, так и в соединениях модульных элементов [45]. Тепловые потери вследствие неудачного конструктивного решения могут уменьшать эффективность используемых материалов [46]. Для оценки всех параметров модульных фасадов и отслеживания изменений в реальном времени требуются экспериментальные устройства, оборудованные специализированными датчиками, для снятия точных данных [47, 48]. Моделирование условий при невозможности выполнить натурный эксперимент с необходимыми данными имеет потенциал для дальнейших исследований [49, 50].

На рис. 1 представлен жилой дом, собранный из модульных фасадов, что демонстрирует архитектурную гибкость и эстетическую привлекательность этой технологии [8].

Цель исследования — выполнить обзор современных научных работ в области теплотехнических характеристик модульных фасадных систем; изучить применяемые энергоэффективные материалы, влияние конструктивных решений, стенды для имитации натуральных условий.



Рис. 1. Жилой дом, собранный из модульных фасадов, по данным М. Bagarić и соавт.: *a* — модульная стена; *b* — крепление модулей друг к другу; *c* — финальный этап сборки здания [8]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор литературы включал изучение и описание как российских, так и зарубежных источников. Использовались российские статьи из списка ВАК. Описывались зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных Scopus и Web of Science. Поиск проводился на платформах MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink и Scopus. Отбор статей для изучения осуществлялся по ключевым словам. Большинство приведенных источников опубликованы за последние 6 лет. На публикации всех авторов приведены библиографические ссылки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в области выбора энергоэффективных материалов для конструкции модульного фасада

При разработке модульной фасадной системы J. Li и соавт. экспериментально оценили тепловую эффективность двух передовых изоляционных материалов: аэрогелевого покрытия и вакуумных изоляционных панелей [21]. Данные, полученные с помощью инфракрасной термографии, продемонстрировали более высокие теплозащитные качества аэрогеля в сравнении с минеральной ватой [21].

Представлены фотографии различных теплоизоляционных материалов, выполненные с помощью тепловизионной камеры (рис. 2) [21].

При установке в предложенную авторами модульную конструкцию и вакуумные, и аэрогелевые

панели показали повышение теплотехнических характеристик по сравнению с традиционными классическими решениями. Согласно китайскому нормативу GB 50189–2015 «Нормативы проектирования энергоэффективности общественных зданий», диапазон требуемого коэффициента теплопередачи для наружных стеновых ограждающих конструкций в холодном климате Китая составляет от 0,45 до 0,50 Вт/(м²·К). Применение вакуумных панелей в конструкции модульного фасада позволило достичь экономии 73–76 % относительно нормативных показателей благодаря низкой теплопроводности устанавливаемых панелей. Аэрогелевое покрытие, хотя и несколько уступает вакуумным панелям по достигаемым теплотехническим характеристикам, также обеспечило снижение теплопередачи (43–49 % по сравнению с требованиями норматива) [21].

Авторы разработали модульную фасадную систему таким образом, чтобы совместить энергосберегающие материалы в стандартизированные сборные компоненты. Аэрогелевое покрытие интегрируется в многослойную конструкцию, включающую конструктивные плиты, влагозащитные мембраны и внутреннюю отделку. Данный подход позволяет гибко использовать как вакуумные панели, так и аэрогель в зависимости от требуемого уровня теплозащиты.

Представлена сборная фасадная система по данным J. Li и соавт. (рис. 3) [21].

В рамках исследовательского проекта HPWalls (Высокоэффективные стеновые системы) А. Scioti и соавт. разработали и запатентовали сборные несущие стены из армированного пенополистиролбетона.

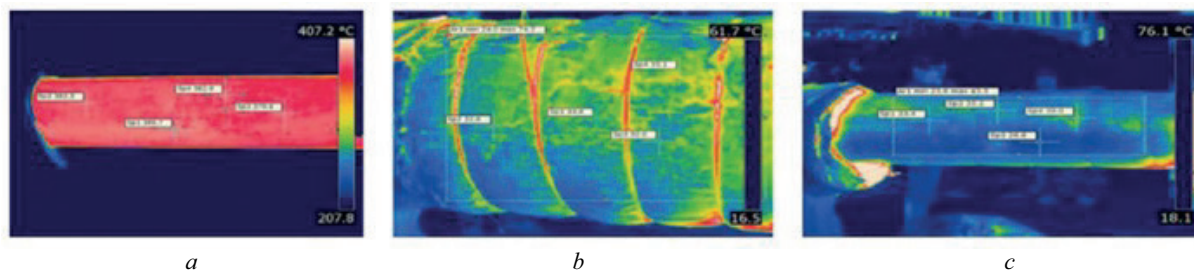


Рис. 2. Фотографии, полученные с помощью тепловизионной камеры, по данным J. Li и соавт. [21]: *a* — трубопровод без тепловой изоляции; *b* — минеральная вата; *c* — аэрогель

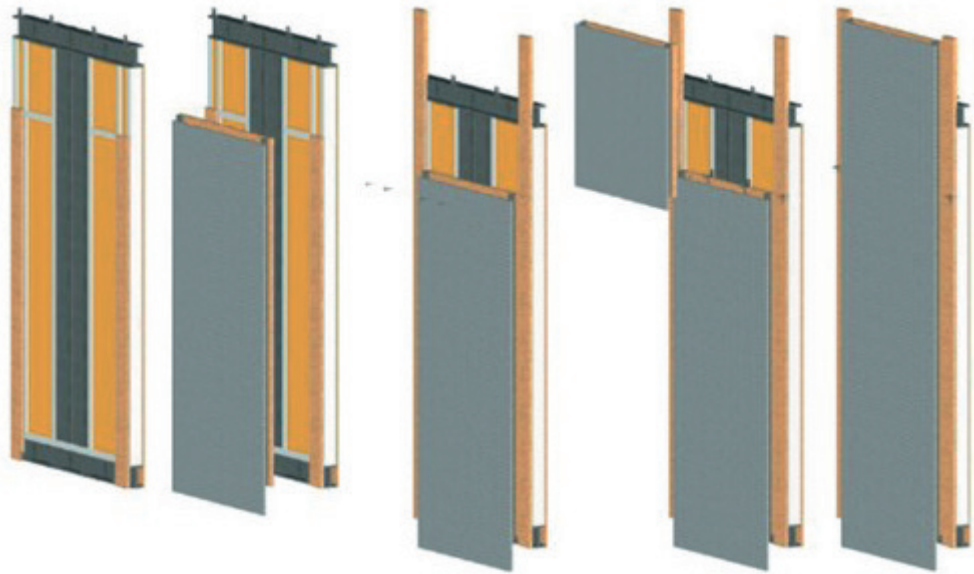


Рис. 3. Сборная фасадная система по данным J. Li и соавт. [21]

В работе авторы предлагают следующие технические решения: уменьшение мостиков холода и поиск баланса в замещении песка вспененным полистиролом для оптимального соотношения тепловых и механических характеристик [27].

Применяли два подхода. Первый заключался в замене песка пенополистиролом в возрастающих процентных соотношениях с сохранением исходной гранулометрической кривой заполнителя. Второй — в замене песка пенополистиролом с предварительным рассевом на частицы заданного размера. Первый подход, с одной стороны, приводит к ухудшению механических свойств из-за несоответствия гранулометрических составов компонентов, однако позволяет добиться экономической эффективности и сокращения трудоемкости процесса [27].

Для исследованных смесей определялись теплофизические характеристики: теплопроводность и объемная теплоемкость с использованием портативного прибора Isomet 2104 (Applied Precision Inc.) с поверхностным датчиком по стандарту UNI EN 12667:2002. Паропроницаемость и коэффициент сопротивления паропроницанию оценивали методом мокрой чаши согласно ISO 12572:2016 в климатической камере Perani AC520 при температуре 23 °C и относительной влажности 50 %. Прочность на сжатие определяли в соответствии с комплексом стандартов UNI EN 12390-2/3/4:2019. На заключительном этапе смеси классифицировали по итальянским нормам на конструкционные и неконструкционные, а также на легкие и обычные. Из десяти образцов, подготовленных авторами в процессе эксперимента, три

Процентное содержание заполнителей в исследованных смесях по данным A. Sciotti и соавт. [27]

Номер	Вспененный полистирол						Песок					
	Размер гранул, мм						Размер гранул, мм					
	0–0,5	0,5–1	1–2	2–4	4–6	6–8	0–0,5	0,5–1	1–2	2–4	4–6	6–8
S0	0						100 %					
S1	25 %						75 %					
S2	50 %						50 %					
S3	75 %						25 %					
S4	100 %						0					
S5			1–2				0–1				2–8	
S6				2–4			0–2				4–8	
S7					4–8		0–4					
S8			1–4				0–1				4–8	
S9				2–8			0–2					
S10				1–8			0–1					

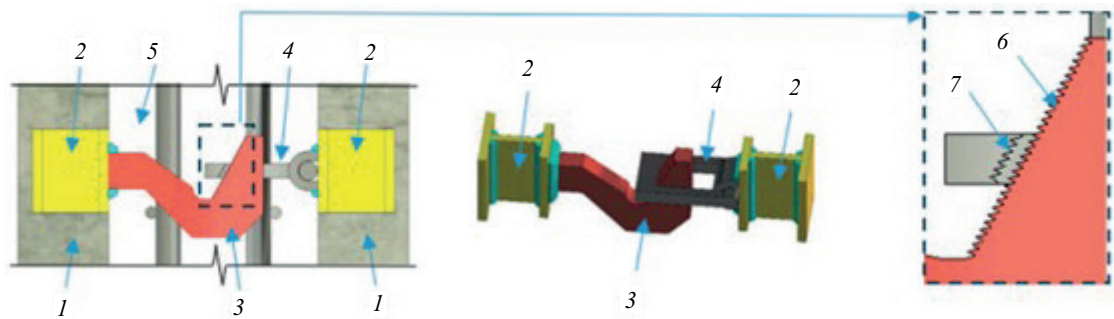


Рис. 4. Схема системы внутренних стяжек по данным X. Zou и соавт.: 1 — боковая стенка из сборного железобетона; 2 — заделка; 3 — крюк; 4 — петля; 5 — монолитный бетон; 6 — зубчатая поверхность на крюке; 7 — зубчатая поверхность на петле



Рис. 5. Испытание образца на растяжение по данным X. Zou и соавт. [1]

были исключены из-за несоответствия требованиям к легким бетонам. Из образцов легкого бетона только четыре образца можно было использовать в качестве конструкционных материалов. Результаты подтвердили гипотезу о том, что замена песка на пенополистирол в процентном соотношении по всей granulометрической кривой (образцы S1, S2, S3 и S4) является более выгодной с точки зрения затрат времени и ресурсов, но приводит к снижению плотности и ухудшению механических свойств стеновой системы. В результате внедрения в состав пенополистирола смеси становились легкими, их несущая способность падала. Авторы провели исследование теплопроводности структурных смесей (S1, S5, S6, S7, S8, S9). Установлено, что образец S8 (замена песка размером 1–4 мм на пенополистирол соответствующего размера) — наиболее эффективное решение, обеспечивающее наилучшую теплоизоляцию при сохранении конструкционных качеств ($\lambda = 1,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) [27].

Данные о процентной замене гранул приведены в таблице [27].

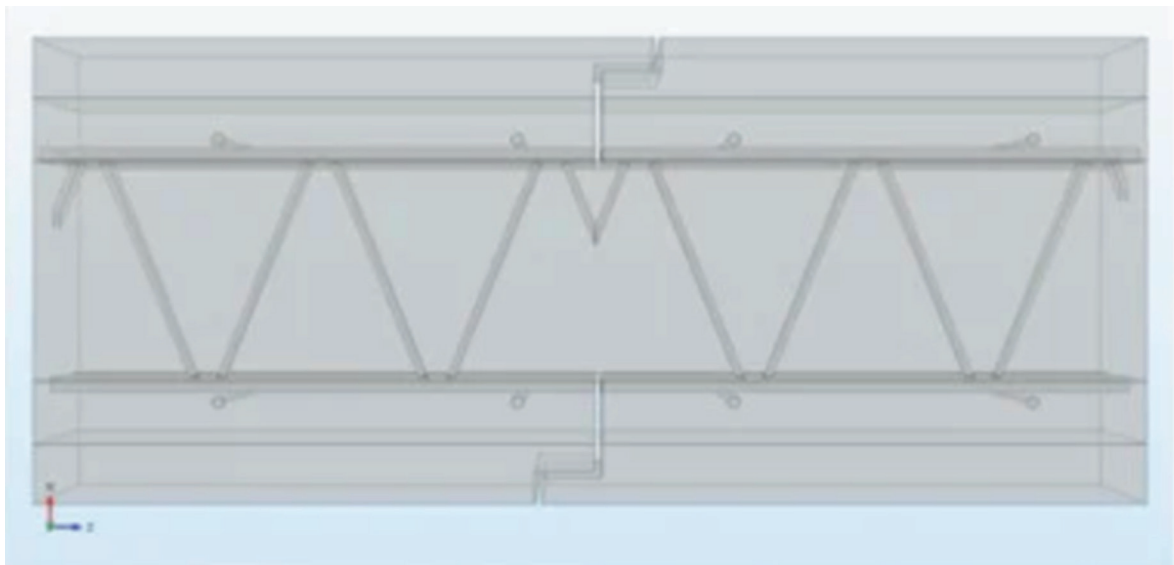


Рис. 6. S-образные соединения модулей по данным A. Sciotti и соавт. [27]

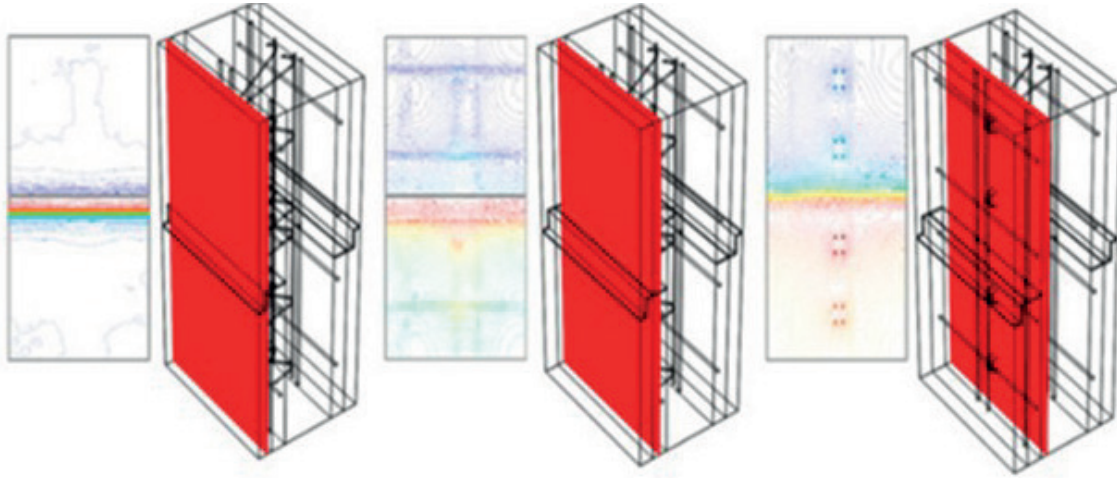


Рис. 7. Температурное поле по данным А. Sciotti и соавт. [27]

Исследования в области создания оптимальной конструкции крепления элементов модульного фасада

Для соединения двух соседних железобетонных модулей в композитную стену Х. Zou и соавт. разработали систему внутренних стяжек (рис. 4) [1].

Конструкция состоит из трех основных частей, устанавливаемых попарно напротив друг друга в стенках двух соседних модулей [1]:

- закладная деталь: Н-образная деталь, бетонизируемая в стенку модуля на заводе;
- крюк: приваривается к закладной детали на одном модуле;
- петля: приваривается к закладной детали на соседнем модуле.

При монтаже петля соседнего модуля опускается под собственным весом и зацепляется за крюк, в результате получается прочное соединение без необходимости разрушения стенок модуля. Система спроектирована для сохранения заводской внутренней отделки при сборке модулей в сооружение. Традиционный метод требует сквозных отверстий под стяжки, что ведет к повреждению отделки и дополнительным работам на площадке. Предложенная Х. Zou система позволяет выполнить всю отделку в заводских условиях, а на стройплощадке лишь соединить модули и залить бетон. Для проверки работоспособности системы были проведены испытания на растяжение для пяти образцов стяжек с разными сценариями монтажных допусков (отклонения до 8 мм) (рис. 5) [1].

В процессе эксперимента все образцы выдержали нагрузки, значительно превышающие расчетные, и разрушились при деформациях от 13,5 до 29,1 мм, что в 2–4 раза больше допустимых 8 мм. Испытания на продавливание бетонных стенок с закладными деталями показали среднюю расчетную несущую способность узла 35,6 кН. Натурные испытания на полную

нагрузку, значительно превышающую расчетные, и разрушились при деформациях от 13,5 до 29,1 мм, что в 2–4 раза больше допустимых 8 мм. Испытания на продавливание бетонных стенок с закладными деталями показали среднюю расчетную несущую способность узла 35,6 кН. Натурные испытания на полную

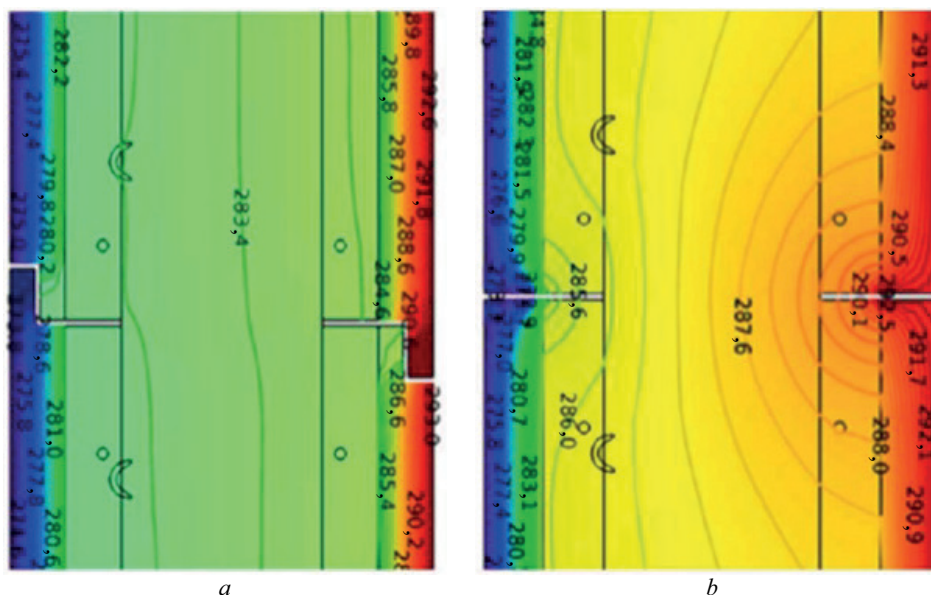


Рис. 8. Поперечное сечение соединений модульных стен по данным А. Sciotti и соавт. [27]: а — S-образные соединения; б — традиционное решение



Рис. 9. Фото существующей установки по данным S.P.B. Sousa и соавт. [26]

размерном макете подтвердили, что деформация стенок при заливке бетона не превышает 3,2 мм [1].

Разработанная система позволила отказаться от сквозных отверстий, сохранить внутреннюю отделку, уменьшить толщину и вес сборных стенок модулей, сократить время монтажа на площадке и снизить стоимость строительства [1].

Для предотвращения появления мостиков холода в модуле A. Sciotti и соавт. спроектировали вертикальные стыки с S-образными профилями (рис. 6) [27].

Компьютерная модель для двух панелей с предложенными соединениями рассчитана в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Проводилось

математическое моделирование температурного поля в двухмерной и трехмерной постановках при перепаде температур 20 °С [27].

Анализ результатов расчетов показал, что ферменная арматура во внутренней полости вызывает локальные искажения изотерм, которые затухают по мере удаления от полости и становятся незначительными на внешней поверхности (рис. 7) [27].

В зоне предложенного S-образного соединения искажение температуры не выявлено [27].

Сравнение с традиционной системой (модули устанавливаются встык с заливкой бетона) продемонстрировало преимущество S-образных профилей. В стандартном решении возникает явный тепловой мостик (рис. 8, б), а разница температур между двумя пенополистирольными панелями достигает 8 К [27].

В предложенной системе этот перепад составляет всего 1,5 К, что обеспечивает более стабильное температурное поле внутренней полости по всему поперечному сечению. Добавление отделочных слоев существенно не влияет на ослабление теплового мостика [27].

Разработка стенда для имитации натуральных климатических условий

S.P.B. Sousa и соавт. применили динамический измеритель теплового потока (Dynamic Heat Flow Meter) для оценки энергоэффективности модульных сэндвич-панелей [26]. В отличие от классического измерителя теплового потока, динамическая версия позволяет программировать изменение температуры во времени, имитируя реальные климатические условия (суточные и сезонные колебания) [26]. Внешний вид существующей установки показан на рис. 9.

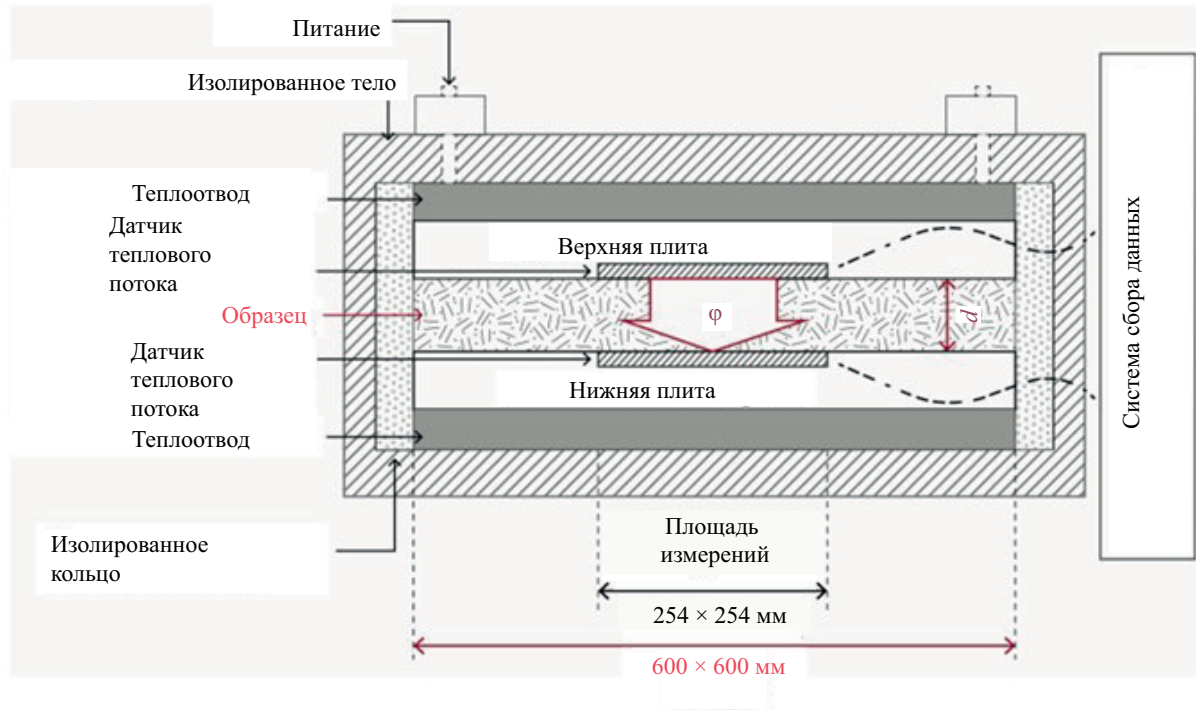


Рис. 10. Чертеж динамического измерителя теплового потока по данным S.P.B. Sousa и соавт. [26]



Рис. 11. Собранный модуль, тестовая ячейка PASLINK по данным Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. [15]

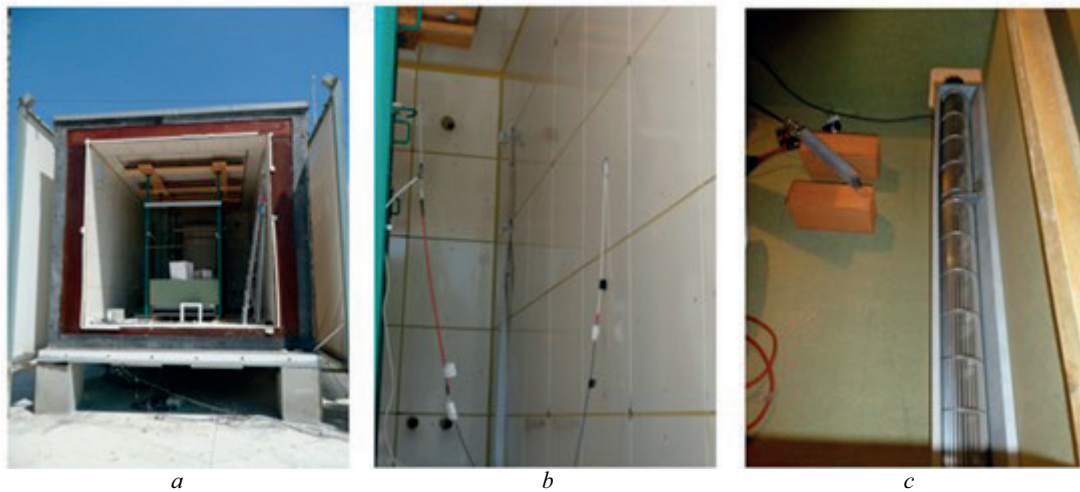


Рис. 12. Размещение датчиков в испытательной камере по данным Z. Azkorra-Larrinaga и соавт.: *a* — южная стена, где расположен испытуемый образец; *b* — датчики температуры воздуха и внутренней поверхности; *c* — электронагреватель и осевой вентилятор [15]

На рис. 10 представлен чертеж динамического измерителя теплового потока, разработанного S.P.B. Sousa и соавт. [26]. Прибор состоит из двух независимо управляемых металлических плит с термоэлектрическими модулями, способными как нагревать, так и охлаждать образец [26].

В нижнюю и верхнюю плиты встроены датчики температуры и теплового потока. Система управления с пропорционально-интегрально-дифференцирующими контроллерами может имитировать различные температурные профили: синусоидальные, ступенчатые, линейные. В описанном авторами эксперименте на верхней плите задавался синусоидальный цикл (от -15 до $+20$ °C с периодом 24 ч) при постоянной температуре 20 °C на нижней плите [26]. По результатам измерений по стандарту EN ISO 13786 производился расчет теплопередачи и временного сдвига [26].

Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. исследовали тепловые характеристики модульной зеленой стены и открытого вентилируемого фасада с использованием тестовой ячейки PASLINK [15]. PASLINK (калориметрическая испытательная ячейка для натурных исследований) — это лабораторная установка для испытания строительных конструкций в реальных погодных условиях. Тестовая ячейка представляет собой модуль, с помощью которого измеряют теплообмен между контролируемой внутренней средой и наружным климатом. Камера состоит из двух секций: испытательного помещения $5,0 \times 2,7 \times 2,7$ м, где размещается система сбора данных, и отсека с оборудованием для обработки информации. На одну из стен устанавливался испытуемый образец. Все ограждающие конструкции исследовательской камеры обшивались утеплителем (рис. 11) [15].

Внутри поддерживалась постоянная температура с помощью электрического нагревателя и осевого вентилятора, предотвращающего температурное расслоение воздуха [15]. На рис. 12 показано размещение датчиков в испытательной камере.

Натурный эксперимент дал возможность учесть влияние солнца, ветра и осадков [15]. Полученные результаты авторы сравнивали с существующими данными для аналогичных фасадных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модульные фасады являются важным предметом научных исследований. Наиболее перспективные на-

правления в изучении модульных фасадных систем: обеспечение низкой теплопроводности строительных материалов, устранение мостиков холода в узлах соединений модулей, обеспечение стойкости конструкции к циклическим перепадам температуры, увлажнению и ветровым нагрузкам. Разработка новых композиционных материалов позволит достигнуть баланса между теплоизоляционными свойствами и несущими свойствами. Одновременное применение экспериментальных подходов с математическим моделированием процессов, протекающих в ограждающих конструкциях зданий, даст возможность объективно оценивать эффективность различных решений по проектированию модульных фасадных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zou X., Huang J., Lu W., Shi Ju., Au S., Zhao Zh. *et al.* An Innovative Composite Wall Inner Tie System Applied to Reinforced Concrete Modular Integrated Construction // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 3052. DOI: 10.3390/buildings14103052. EDN HVUWUM.
2. Al-Homoud M.S. Thermal bridges in building envelopes : a state-of-the-art review // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 200. Pp. 78–92.
3. Яковлев Н.А., Ватин Н.И. Тепловая неоднородность узлов соединений модульных ограждающих конструкций // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2025. № 5 (119). DOI: 10.4123/CUBS.119.7
4. Коркина Е.В. Основное соотношение для оценки энергосбережения при применении остекления с низкоэмиссионными покрытиями // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 4 (796). С. 132–137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ.
5. Jayathilaka R.D.W.W., Waidyasekara K.G.A.S., Sirimewan D.C. The impact of material and labour cost variables on contactors' budgeted cost // *Proceedings of 10th World Construction Symposium 2022*. 2022. Pp. 884–895. DOI: 10.31705/WCS.2022.71
6. Buijze J.A., Wright A.J. The potential for the Passive House standard in Longyearbyen — the High Arctic // *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021. Vol. 42. Issue 3. Pp. 307–325. DOI: 10.1177/0143624421996989. EDN USMWAI.
7. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi Sh., Almaskati D. Modular construction : a comprehensive review // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Issue 12. P. 2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. EDN SRORGP.
8. Bagarić M., Banjad Pečur I., Milovanović B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste : A case study // *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 206. P. 109573. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109573. EDN HHTRHD.
9. Fraunhofer IBP. Integral evaluation of innovative building envelopes // *Fraunhofer Publica*. 2020.
10. Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V. Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems // *Construction Materials and Products*. 2025. Vol. 8. Issue 4. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHN.
11. Гамаюнова О.С. Обоснование стоимости утеплителей от их теплофизических характеристик // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 1 (76). С. 19–29. DOI: 10.18720/CUBS.76.2. EDN MMSZFC.
12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. *et al.* Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. Issue 6. P. 267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.
13. Mohammed M.A., Budaiwi I.M., Al-Osta M.A., Abdou A.A. Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies : a Focused Review // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 917. DOI: 10.3390/buildings14040917. EDN FTPZKC.
14. Niazy D., Metwally E.A., Rifat M., Awad M.I., Elsabbagh A. A conceptual design of circular adaptive façade module for reuse // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 20552. DOI: 10.1038/s41598-023-47593-9. EDN ATKJHY.
15. Azkorra-Larrinaga Z., Romero-Antón N., Martín-Escudero K., Lopez-Ruiz G., Giraldo-Soto C. Evaluation of the Thermal Performance of Two Passive Facade System Solutions for Sustainable Development // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 24. P. 16737. DOI: 10.3390/su152416737. EDN TNBMOV.
16. Salvalai G., Zhao F. Active prefabricated façade with building-integrated photovoltaic (APF-BIPV) technologies for high energy efficient building renovation: a systematic review of recent research advancements //

- Energy and Buildings. 2025. Vol. 348. P. 116440. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116440. EDN PZLXXC.
17. Morganti L., Vandi L., Astudillo Larráz Ju., García-Jaca Ja., Navarro Muedra A., Pracucci A. A1–A5 Embodied Carbon Assessment to Evaluate Bio-Based Components in Façade System Modules // Sustainability. 2024. Vol. 16. Issue 3. P. 1190. DOI: 10.3390/su16031190. EDN HWEHDP.
18. Loizou L., Barati Kh., Shen X., Li B. Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 622. DOI: 10.3390/buildings11120622. EDN WZSCIH.
19. Mohtashami N., Fuchs N., Streblow R., Osterhage T., Müller D., Fotopoulou M. et al. State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBES) // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.3390/en15030829. EDN HPHOKN.
20. Fawaz M., Elghezawy D., Nashaat B., Megahed N.A. Hybrid Façades: A Systematic Review of Integrating Vertical Greenery Systems with Advanced Façade Technologies // Sustainability. 2026. Vol. 18. Issue 6. P. 2882. DOI: 10.3390/su18062882. EDN ZDWCOF.
21. Li J., Lu S., Wang W., Huang J., Chen X., Wang J. Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. Issue 1. DOI: 10.1155/2018/8082368
22. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 8 (124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
23. Loli A., Andersen R., Olesen B.W. A full-scale experimental setup for characterizing the thermal performance of building integrated vacuum insulation panels // Energy and Buildings. 2022. Vol. 274. P. 112432.
24. Arun Solomon A., Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system // Structures. 2020. Vol. 23. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. EDN DDSMAP.
25. Bacher P., Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 7. Pp. 1511–1522. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005
26. Sousa S.P.B., Teixeira H.C., Autretto G., Cárdenas V.V., Fantucci S., Favoino F. et al. Eco-Friendly Sandwich Panels for Energy-Efficient Façades // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 15. P. 6848. DOI: 10.3390/su17156848. EDN KDOVTB.
27. Sciotti A., De Fino M., Martiradonna S., Fatiguso F. Construction Solutions and Materials to Optimize the Energy Performances of EPS-RC Precast Bearing Walls // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 6. DOI: 10.3390/su14063558. EDN QIKWWC.
28. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 10. P. 5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
29. Johnsen K.M., Lassen N., Havran J. Challenges and opportunities for modular housing in the Arctic // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Issue 4. Pp. 265–282.
30. Lee Y., Ng E. Critical review of current understanding of passive façade design in residential buildings // Environmental Research: Infrastructure and Sustainability. 2024. Vol. 4. Issue 3. P. 032001. DOI: 10.1088/2634-4505/ad78fc. EDN RASCIW.
31. Danková A., Bielek B., Szabó D., Kaniková K., Šveda M. Twin Rooms — Experimental Facility for Research on Advanced Facades // Slovak Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 32. Issue 4. Pp. 19–30. DOI: 10.2478/sjce-2024-0022. EDN JCQUZU.
32. Noaman D.S., Moneer S.A., Megahed N.A., El-Ghafour Sh.A. Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. P. 104658. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104658. EDN MXUBGS.
33. Павлова М.О., Захаров В.А. Экспериментальные исследования фасадных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.43-50. EDN ABLQSN.
34. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217. Pp. 787–797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212
35. Mohammadhosseini H., Tahir M.M., Alrshoudi F., Alghamdi H., Alharbi Y.R., Alsaif A. et al. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 32. P. 101723. DOI: 10.1016/j.jobee.2020.101723. EDN LEWMDB.
36. Maroy K., Steeman M., Van Den Bossche N. Air flows between prefabricated insulation modules and the existing façade: A numerical analysis of the adaption layer // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 885–890. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.695
37. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 214. Pp. 365–376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304
38. Eberhardt L.Ch.M., Birkved M., Birgisdottir H. Building design and construction strategies for a circular economy // Architectural Engineering and Design Management. 2022. Vol. 18. Issue 2. Pp. 93–113. DOI: 10.1080/17452007.2020.1781588. EDN UJRDEO.
39. Teng Y., Li K., Pan W., Ng T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: A case study of a high-rise residential building in Hong Kong // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 886.
40. Guerra B.C., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers //

Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617. EDN SPAANA.

41. Fokaides P.A., Jurelionis A., Gineika A. A review of the thermal performance of vacuum insulation panels and their applications in the building sector // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 70. Pp. 198–210.

42. Gennaro G., Favoino F., Goia F., Michele G.De., Perino M. Calibration of DSF model for real-time control // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2069. P. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012027

43. Soares J., Oliveira A. Numerical simulation of a hybrid CSP/Biomass 5 MWel power plant // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1850. P. 110014. DOI: 10.1063/1.4984488

44. Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., Goia F. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 179. Pp. 165–182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017

45. Elghazi Y., Elshafei G. Green building envelope: A comparative analysis of vertical greenery systems

and green roofs // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61. Issue 9. Pp. 7269–7280.

46. Campelo R.P., da Silva L.R.R. Passive façade systems for energy efficiency in buildings : a systematic review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157. P. 112044.

47. Liu Z., Li J., Zhai Z.J. A review of the application of modular building in different climate zones // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 72. P. 106652.

48. Kim D., Lee S. Bibliometric analysis of research trends in modular construction from 2010 to 2024 // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. P. 105378.

49. Gorse C., Johnston D., Boukhanouf R. The economic viability of passive house in challenging climates // *Energy Policy*. 2020. Vol. 147. P. 111826.

50. Van Schilt I.M., Kwakkel J.H., Mense J.P., Verbraeck A. A simulation-based approach for reconstructing a diverse set of supply chain models with sparse data using a quality diversity algorithm // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2026. Vol. 146. P. 103216. DOI: 10.1016/j.simpat.2025.103216. EDN JYHAZF.

Поступила в редакцию 26 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Кирилл Павлович Зубарев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей и прикладной физики, доцент кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; старший научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, ведущий научный сотрудник научного центра техники и технологий строительства; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; РИНЦ ID: 831037, Scopus: 57202815810, ResearcherID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; zubarevkiiril93@mail.ru;

Вячеслав Владимирович Казунин — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; kvv-vyacheslav@yandex.ru;

Виктор Львович Добшиц — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0005-9085-6308; 89153383886@mail.ru;

Левон Гарегинович Гаранян — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-0374-7322; Levongaranyan@yandex.ru;

Михаил Валерьевич Емельянов — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 656092, Scopus: 57190730889, ResearcherID: M-1400-2014, ORCID: 0000-0002-1459-2911; Emelianov@mgsu.ru;

Мария Антоновна Слизова — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0002-4309-0651; slizovamaria9@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Modular facade construction offers several advantages over conventional building construction [1, 2]. The construction time of buildings is reduced through the use of factory-prefabricated facades or entire residential modules [3, 4]. Cost savings are achieved through shorter construction time, since labor wages account for a substantial share of on-site costs [5, 6]. Modular facades enable experimental laboratory studies to be performed on a completed building element [7, 8]. Buildings assembled from modular structures may in some cases be more environmentally friendly and energy efficient [9, 10], because factory assembly makes it possible to use materials that are rarely applied on construction sites due to installation difficulties [11, 12]. Factory assembly also improves the installation quality of such building envelope elements as thermal insulation and air cavities [13, 14]. The environmental performance of modular facades is justified by the selection of materials of natural origin [15, 16] and reusable materials [17, 18], by reduced carbon footprint [19, 20], and by the possibility of minimizing installation waste [21, 22]. An additional advantage is factory quality control, which reduces the risk of defects [23].

The thermal performance of building materials affects energy consumption [24]. Reducing the thermal conductivity of building envelope structures decreases heat losses in winter and prevents overheating in summer, which directly reduces the load on heating, ventilation and air-conditioning systems [25, 26]. Modified compositions of basic building materials and various structural solutions for modules are among the priority tasks in modular construction [27, 28]. Extreme climates, including Arctic climates, require innovative approaches [29].

Most existing studies on modular facades concern active modules [30, 31], while far fewer address smart [32, 33], green [34, 35] and passive modules [36, 37] (the classification is proposed in a comprehensive review of modular facades [38]). Almost all studies have also been conducted for temperate climates [39, 40]. Compared with 2023, the interest of construction researchers in modular facades increased in 2025 [41, 42]. Extreme conditions require innovative approaches to energy-efficient modular construction [43]. Under such conditions, the payback period

of modules that meet the required heating standards exceeds the service life of the building [44].

When modular structures are developed, thermal bridges must be taken into account both within the structure itself and in the connections between modular elements [45]. Heat losses caused by an unsuccessful structural solution may reduce the effectiveness of the materials used [46]. To evaluate all parameters of modular facades and monitor changes in real time, experimental devices equipped with specialized sensors are required to obtain accurate data [47, 48]. Simulation of conditions, when it is impossible to perform a full-scale experiment with the required data, has potential for further research [49, 50].

Fig. 1 shows an apartment building assembled from modular facades, demonstrating the architectural flexibility and aesthetic appeal of this technology [8].

The purpose of the study is to review recent research articles focused on the thermal performance of modular facade systems and to examine the energy-efficient materials used, the influence of structural solutions, and test stands for simulating full-scale conditions.

MATERIALS AND METHODS

The literature review included the study and description of both Russian and international sources. Russian papers from the VAK list were used. International sources indexed in the Scopus and Web of Science databases were described. The search was performed on the MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink and Scopus platforms. Papers were selected for the study by keywords. Most of the cited sources were published during the last six years. Bibliographic references are provided for the publications of all authors.

RESULTS

Studies on the selection of energy-efficient materials for modular facade construction

In developing a modular facade system, J. Li et al. experimentally evaluated the thermal performance of two advanced insulating materials: aerogel coatings and vacuum insulation panels [21]. Data obtained by infrared thermography demonstrated the higher thermal



Fig. 1. An apartment building assembled from modular facades, according to M. Bagarić et al.: *a* — modular wall; *b* — attachment of modules to each other; *c* — final stage of building assembly [8]

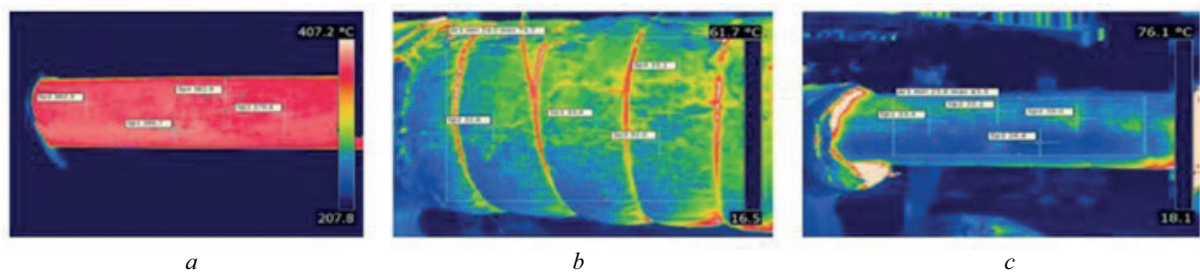


Fig. 2. Photographs taken with a thermal imaging camera according to J. Li et al. [21]: *a* — pipeline without thermal insulation; *b* — mineral wool; *c* — aerogel

protection performance of aerogel compared with mineral wool [21].

Photographs of various thermal insulation materials taken with a thermal imaging camera are presented in Fig. 2 [21].

When incorporated into the modular structure proposed by the authors, both vacuum insulation panels and aerogel panels improved thermal performance compared with conventional solutions. According to the Chinese standard GB 50189–2015 “Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings”, the required thermal transmittance range for external wall envelope structures in the cold climate of China is 0.45–0.50 W/(m²·K). The use of vacuum panels in the modular facade made it possible to achieve savings of 73–76 % relative to standard values due to the low thermal conductivity of the installed panels. Although the aerogel coating is somewhat inferior to vacuum panels in terms of achievable thermal performance, it also provided a reduction in heat transfer (43–49 % compared with the standard requirements) [21].

The authors designed the modular facade system so that energy-saving materials could be integrated into standardized prefabricated components. The aerogel coating is incorporated into a multilayer structure that includes structural boards, moisture-protective membranes

and interior finishing. This approach allows both vacuum panels and aerogel to be used flexibly, depending on the required level of thermal protection.

A prefabricated facade system made according to J. Li et al. is presented in Fig. 3 [21].

Within the HPWalls (High Performance Wall Systems) research project, A. Sciotti et al. developed and patented prefabricated load-bearing walls made of reinforced expanded polystyrene concrete. The authors propose the following engineering solutions: reduction of thermal bridges and identification of a balance in replacing sand with expanded polystyrene to obtain an optimal ratio of thermal and mechanical characteristics [27].

Two approaches were used. The first involved replacing sand with increasing percentages of expanded polystyrene while maintaining the original aggregate particle-size distribution. The second involved replacing sand with expanded polystyrene after preliminary sieving into particles of pre-set size. The first approach results in poorer mechanical properties due to incompatibility between the particle-size distributions of the components; however, it improves cost efficiency and reduces the labor intensity of the process [27].

For the mixtures studied, the thermophysical properties were determined as follows: thermal conductivity and

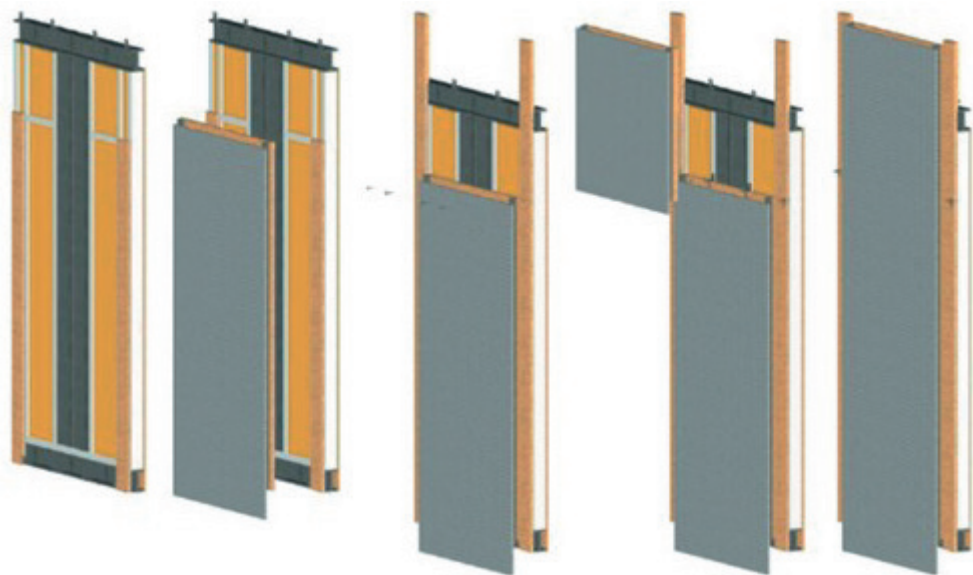


Fig. 3. Prefabricated facade system according to J. Li et al. [21]

Percentage content of aggregates in the studied mixtures according to A. Sciotti et al. [27]

Number	Expanded polystyrene						Sand					
	Granule size, mm						Granule size, mm					
	0–0.5	0.5–1	1–2	2–4	4–6	6–8	0–0.5	0.5–1	1–2	2–4	4–6	6–8
S0	0						100 %					
S1	25 %						75 %					
S2	50 %						50 %					
S3	75 %						25 %					
S4	100 %						0					
S5			1–2				0–1			2–8		
S6				2–4			0–2				4–8	
S7					4–8		0–4					
S8			1–4				0–1				4–8	
S9				2–8			0–2					
S10			1–8				0–1					

volumetric heat capacity were measured using a portable Isomet 2104 instrument (Applied Precision Inc.) equipped with a surface probe, in accordance with UNI EN 12667:2002. Water vapour permeability and the water-vapour diffusion resistance factor were assessed by the wet-cup method according to ISO 12572:2016, using a Perani AC520 climatic chamber at 23 °C and 50 % relative humidity. Compressive strength was determined in accordance with the UNI EN 12390-2/3/4:2019 set of standards. At the final stage, the mixtures were classified according to Italian standards as structural and non-structural, as well as lightweight and normal-weight. Of the ten specimens prepared by the authors during the experiment, three were excluded because they did not meet the requirements for lightweight concrete. Among the lightweight concrete specimens, only four could be used as structural materials. The results confirmed the hypothesis that replacing sand with expanded polystyrene as a percentage over the entire grading curve (specimens S1, S2, S3 and S4) is more advantageous in terms of time and resource costs, but leads to lower density and deterioration of the mechanical properties of the wall system. As expanded polystyrene was introduced into the mixture composition, the mixtures became lightweight and their load-bearing capacity decreased. The authors studied the thermal conductivity of structural mixtures (S1, S5, S6, S7, S8 and S9).

It was established that specimen S8 (replacement of sand with a particle size of 1–4 mm by expanded polystyrene of the corresponding size) is the most effective solution, providing the best thermal insulation while preserving structural properties ($\lambda = 1.15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) [27].

Data on the percentage replacement of aggregate granules are presented in the Table [27].

Studies on the development of an optimal fastening design for modular facade elements

X. Zou et al. developed an internal tie system to connect two adjacent reinforced concrete modules into a composite wall (Fig. 4) [1].

The structure has three main parts installed in pairs opposite each other in the walls of two adjacent modules [1]:

- embedded part: an H-shaped element cast into the module wall at the factory;
- hook: welded to the embedded part on one module;
- loop: welded to the embedded part on the adjacent module.

During installation, the loop of the adjacent module descends under its own weight and engages with the hook, resulting in a strong connection without the need to damage the module walls. The system is designed to preserve the factory-applied interior finish when the modules are assembled into a structure. The conventional

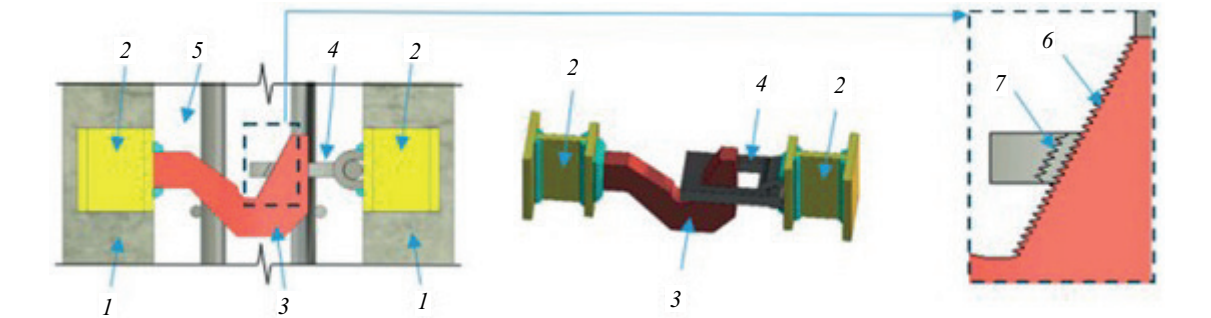


Fig. 4. Diagram of the internal tie system according to X. Zou et al.: 1 — precast concrete side wall; 2 — embedment; 3 — hook; 4 — loop; 5 — cast-in-situ concrete; 6 — serrated surface on the hook; 7 — serrated surface on the loop [1]



Fig. 5. Tensile test of the specimen according to X. Zou et al. [1]

method requires through-holes for ties, which damages the finish and requires additional on-site work. The system proposed by X. Zou makes it possible to complete all finishing operations under factory conditions, while only connecting the modules and placing concrete on site. To verify the serviceability of the system, tensile tests were carried out on five tie specimens under different installation tolerance scenarios (deviations of up to 8 mm) (Fig. 5) [1].

During the experiment, all specimens withstood loads significantly exceeding the design values and failed at deformations ranging from 13.5 to 29.1 mm, which is 2–4 times greater than the permissible 8 mm. Punching tests of concrete walls with embedded parts showed an average design bearing capacity of the joint of 35.6 kN. Full-scale tests on a full-size model confirmed that wall deformation during concrete casting did not exceed 3.2 mm [1].

The developed system made it possible to avoid through-holes, preserve the interior finish, reduce the thick-

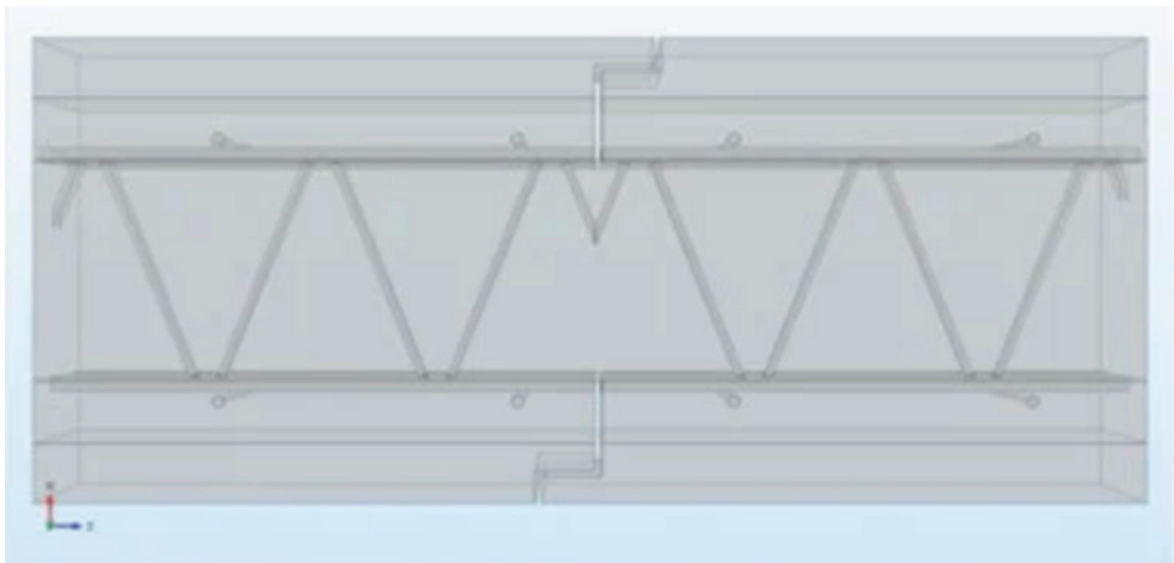


Fig. 6. S-shaped connections of modules according to A. Sciotti et al. [27]

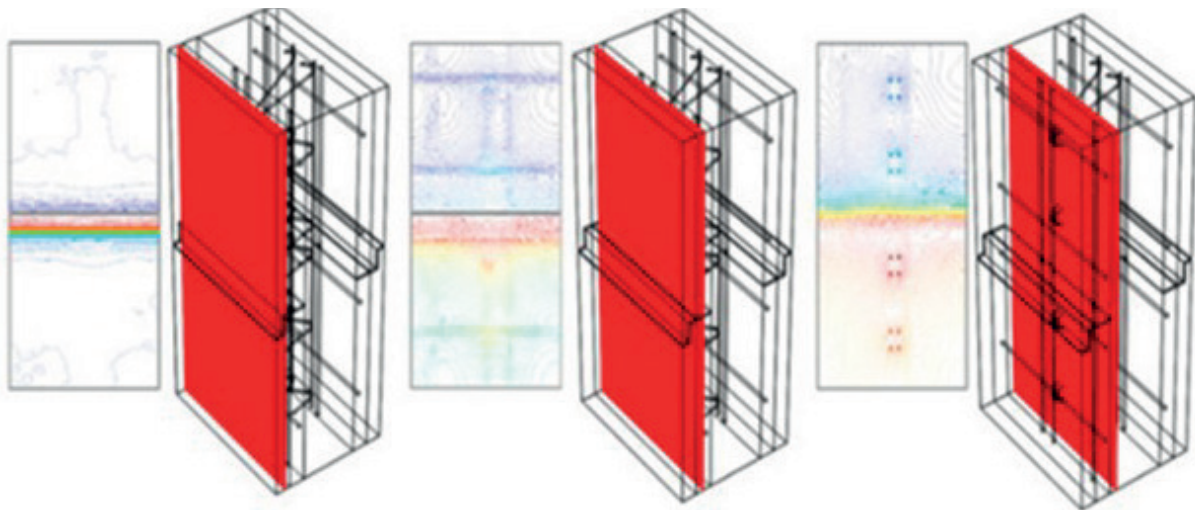


Fig. 7. Temperature field according to A. Sciotti et al. [27]

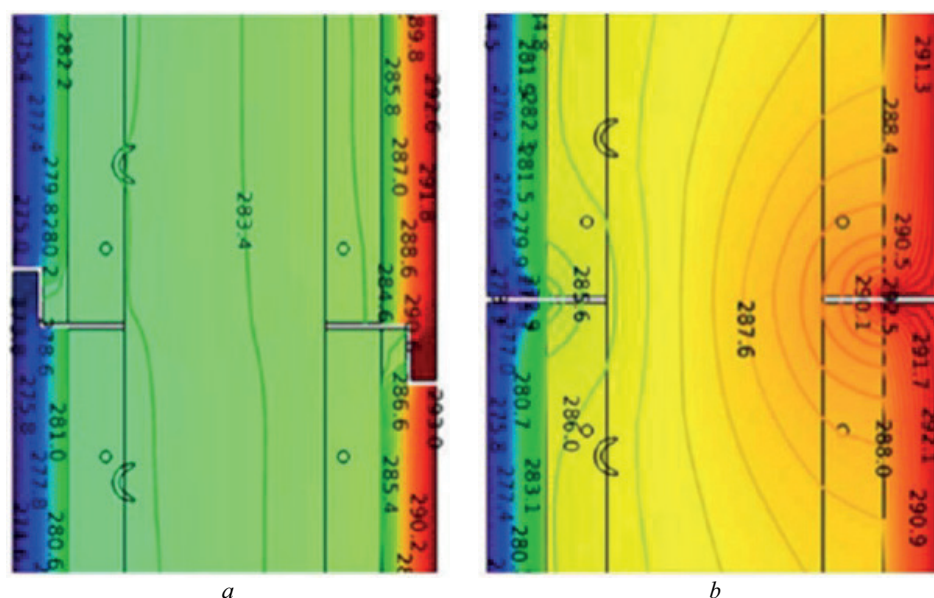


Fig. 8. Cross-section of modular wall joints according to A. Sciotti et al. [27]: *a* — S-shaped connections; *b* — traditional solution

ness and weight of the prefabricated module walls, shorten on-site installation time and reduce construction cost [1].

To prevent thermal bridges in the module, A. Sciotti et al. designed vertical joints with S-shaped profiles (Fig. 6) [27].

A computer model made for two panels with the proposed connections was calculated in COMSOL Multiphysics. Mathematical modeling of the temperature field was performed in two-dimensional and three-dimensional formulations with a temperature difference of 20 °C [27].

Analysis of the calculation results showed that truss reinforcement in the inner cavity causes local distortion of isotherms; these distortions attenuate with distance from the cavity and become insignificant on the external surface (Fig. 7) [27].

No temperature distortion was detected in the zone of the proposed S-shaped connection [27].

Comparison with the traditional system (butt-jointed modules with concrete casting) demonstrated the advantage of S-shaped profiles. In the standard solution, a distinct thermal bridge appears (Fig. 8, *b*), and the temperature difference between two expanded polystyrene panels reaches 8 K [27].

In the proposed system, this difference is only 1.5 K, which provides a more stable temperature field in the inner cavity across the entire cross-section. The addition of finishing layers has no significant effect on reducing the thermal bridge [27].

Development of a test stand for simulating full-scale climatic conditions

S.P.B. Sousa et al. used a Dynamic Heat Flow Meter to evaluate the energy efficiency of modular sandwich panels [26]. Unlike a conventional heat flow meter, the dynamic version makes it possible to program temperature changes over time, simulating real climatic

conditions (daily and seasonal variations) [26]. The appearance of the existing setup is shown in Fig. 9.

Fig. 10 presents the drawing of the dynamic heat flow meter developed by S.P.B. Sousa et al. [26]. The device has two independently controlled metal plates with thermoelectric modules capable of both heating and cooling the specimen [26].

Temperature and heat flow sensors are embedded in the lower and upper plates. A control system with proportional-integral-derivative (PID) controllers can simulate various temperature profiles: sinusoidal, stepwise and linear. In the experiment described by the authors, a sinusoidal cycle was set for the upper plate (from –15 to +20 °C with a period of 24 h) at a constant temperature



Fig. 9. Photograph of the existing setup according to S.P.B. Sousa et al. [26]

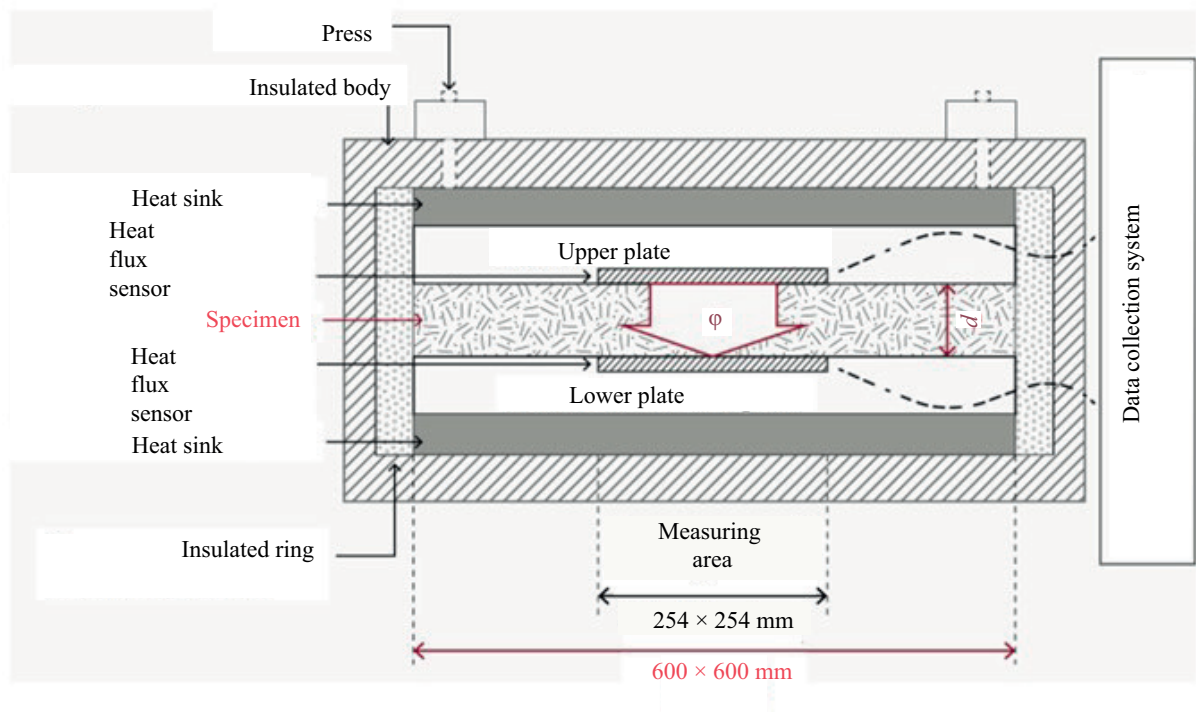


Fig. 10. Drawing of the Dynamic Heat Flow Meter according to S.P.B. Sousa et al. [26]



Fig. 11. Assembled module, PASLINK test cell according to Z. Azkorra-Larrinaga et al. [15]

of 20 °C on the lower plate [26]. Based on measurements according to EN ISO 13786, heat transfer and time shift were calculated [26].

Z. Azkorra-Larrinaga et al. studied the thermal characteristics of a modular green wall and an open ventilated

facade using a PASLINK test cell [15]. PASLINK (a calorimetric test cell for full-scale studies) is a laboratory facility for testing building structures under real weather conditions. The test cell is a module used to measure heat exchange between the controlled indoor environment

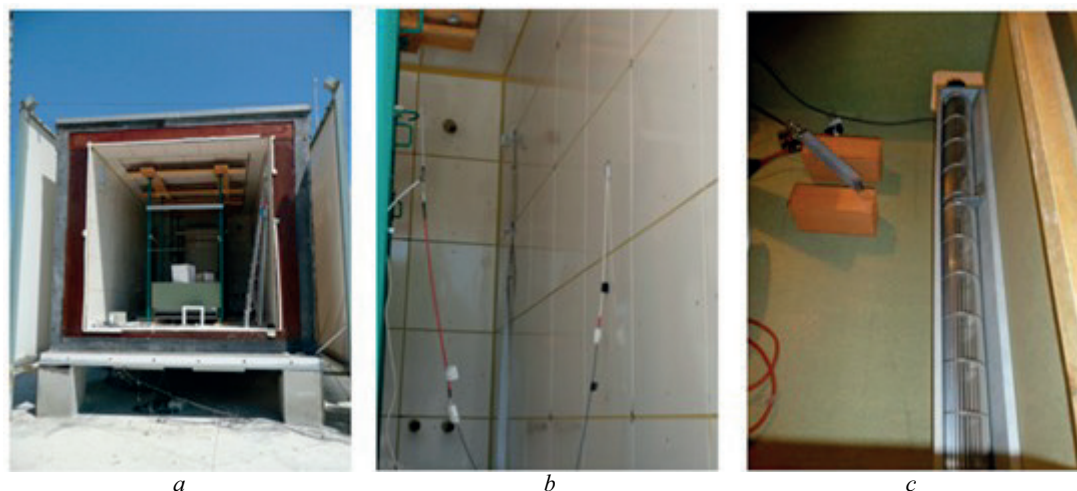


Fig. 12. Arrangement of sensors in the test chamber according to Z. Azkorra-Larrinaga et al.: *a* — south wall where the test specimen is located; *b* — air and internal surface temperature sensors; *c* — electric heater and axial fan [15]

and the outdoor climate. The chamber has two sections: a $5.0 \times 2.7 \times 2.7$ m test room, which houses the data collection system, and a compartment with information processing equipment. A test specimen was installed on one of the walls. All envelope structures of the research chamber were covered with insulation material (Fig. 11) [15].

A constant temperature was maintained inside by means of an electric heater and an axial fan that prevented temperature stratification of the air [15]. Fig. 12 shows the arrangement of sensors in the test chamber.

This full-scale experiment made it possible to take into account the effects of solar radiation, wind and precipitation [15]. The results obtained by the authors were compared with existing data for similar facade systems.

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Modular facades are an important subject of scientific research. The most promising areas in the study of modular facade systems include reducing the thermal conductivity of building materials, eliminating thermal bridges in module connection joints, and improving structural resistance to cyclic temperature variations, moisture, and wind loads. The development of new composite materials can help achieve a balance between thermal insulation performance and load-bearing capacity. Combining experimental approaches with mathematical modeling of processes occurring in building envelope structures enables an objective assessment of the effectiveness of various design solutions for modular facade systems.

REFERENCES

1. Zou X., Huang J., Lu W., Shi Ju., Au S., Zhao Zh. et al. An Innovative Composite Wall Inner Tie System Applied to Reinforced Concrete Modular Integrated Construction. *Buildings*. 2024; 14(10):3052. DOI: 10.3390/buildings14103052. EDN HVUWUM.
2. Al-Homoud M.S. Thermal bridges in building envelopes : a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2019; 200:78-92.
3. Yakovlev N.A., Vatin N.I. Thermal heterogeneity of joints of modular enclosing structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2025; 5(119). DOI: 10.4123/CUBS.119.7 (rus.).
4. Korkina E.V. The main ratio for evaluating energy savings when using glazing with low-emission coatings. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2025; 4(796):132-137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ. (rus.).
5. Jayathilaka R.D.W.W., Waidyasekara K.G.A.S., Sirimewan D.C. The impact of material and labour cost variables on contactors' budgeted cost. *Proceedings of 10th World Construction Symposium 2022*. 2022; 884-895. DOI: 10.31705/WCS.2022.71
6. Buijze J.A., Wright A.J. The potential for the Passive House standard in Longyearbyen — the High Arctic. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021; 42(3):307-325. DOI: 10.1177/0143624421996989. EDN USMWAI.
7. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi Sh., Almaskati D. Modular construction : a comprehensive review. *Buildings*. 2025; 15(12):2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. EDN SRORGP.
8. Bagarić M., Banjad Pečur I., Milovanović B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste : a case study. *Energy and Buildings*. 2020; 206:109573. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109573. EDN HHTRHD.
9. Fraunhofer IBP. Integral evaluation of innovative building envelopes. *Fraunhofer Publica*. 2020.

10. Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V. Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems. *Construction Materials and Products*. 2025; 8(4). DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHH.
11. Gamayunova O.S. Determination of the cost of insulation on their thermophysical characteristics. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019; 1(76):19-29. DOI: 10.18720/CUBS.76.2. EDN MMSZFC. (rus.).
12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. et al. Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(6):267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.
13. Mohammed M.A., Budaiwi I.M., Al-Osta M.A., Abdou A.A. Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies : a Focused Review. *Buildings*. 2024; 14(4):917. DOI: 10.3390/buildings14040917. EDN FTPZKC.
14. Niazy D., Metwally E.A., Rifat M., Awad M.I., Elsabbagh A. A conceptual design of circular adaptive façade module for reuse. *Scientific Reports*. 2023; 13(1):20552. DOI: 10.1038/s41598-023-47593-9. EDN ATKJHY.
15. Azkorra-Larrinaga Z., Romero-Antón N., Martín-Escudero K., Lopez-Ruiz G., Giraldo-Soto C. Evaluation of the Thermal Performance of Two Passive Facade System Solutions for Sustainable Development. *Sustainability*. 2023; 15(24):16737. DOI: 10.3390/su152416737. EDN TNBMOV.
16. Salvalai G., Zhao F. Active prefabricated façade with building-integrated photovoltaic (APF-BIPV) technologies for high energy efficient building renovation: a systematic review of recent research advancements. *Energy and Buildings*. 2025; 348:116440. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116440. EDN PZLXXC.
17. Morganti L., Vandi L., Astudillo Larraz Ju., García-Jaca Ja., Navarro Muedra A., Pracucci A. A1–A5 Embodied Carbon Assessment to Evaluate Bio-Based Components in Façade System Modules. *Sustainability*. 2024; 16(3):1190. DOI: 10.3390/su16031190. EDN HWEHDP.
18. Loizou L., Barati Kh., Shen X., Li B. Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation. *Buildings*. 2021; 11(12):622. DOI: 10.3390/buildings11120622. EDN WZSCIH.
19. Mohtashami N., Fuchs N., Streblow R., Osterhage T., Müller D., Fotopoulou M. et al. State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBES). *Energies*. 2022; 15(3). DOI: 10.3390/en15030829. EDN HPHOKN.
20. Fawaz M., Elgheznawy D., Nashaat B., Megahed N.A. Hybrid Façades: A Systematic Review of Integrating Vertical Greenery Systems with Advanced Façade Technologies. *Sustainability*. 2026; 18(6):2882. DOI: 10.3390/su18062882. EDN ZDWCOF.
21. Li J., Lu S., Wang W., Huang J., Chen X., Wang J. Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018; 2018(1). DOI: 10.1155/2018/8082368
22. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 8(124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
23. Loli A., Andersen R., Olesen B.W. A full-scale experimental setup for characterizing the thermal performance of building integrated vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*. 2022; 274:112432.
24. Arun Solomon A., Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. *Structures*. 2020; 23:204-213. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. EDN DDSMAP.
25. Bacher P., Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*. 2011; 43(7):1511-1522. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005
26. Sousa S.P.B., Teixeira H.C., Autretto G., Cárdenas V.V., Fantucci S., Favoino F. et al. Eco-Friendly Sandwich Panels for Energy-Efficient Façades. *Sustainability*. 2025; 17(15):6848. DOI: 10.3390/su17156848. EDN KDOVTB.
27. Sciotti A., De Fino M., Martiradonna S., Fatiguso F. Construction Solutions and Materials to Optimize the Energy Performances of EPS-RC Precast Bearing Walls. *Sustainability*. 2022; 14(6). DOI: 10.3390/su14063558. EDN QIKWWC.
28. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes. *Sustainability*. 2022; 14(10):5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
29. Johnsen K.M., Lassen N., Havran J. Challenges and opportunities for modular housing in the Arctic. *Polar Geography*. 2021; 44(4):265-282.
30. Lee Y., Ng E. Critical review of current understanding of passive façade design in residential buildings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. 2024; 4(3):032001. DOI: 10.1088/2634-4505/ad78fc. EDN RASCIW.
31. Danková A., Bielek B., Szabó D., Kaniková K., Šveda M. Twin Rooms — Experimental Facility for Research on Advanced Facades. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2024; 32(4):19-30. DOI: 10.2478/sjce-2024-0022. EDN JCQUZU.

32. Noaman D.S., Moneer S.A., Megahed N.A., El-Ghafour Sh.A. Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56:104658. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104658. EDN MXUBGS.
33. Pavlova M.O., Zakharov V.A. Experimental studies of facade structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 4:43-50. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.43-50. EDN ABLQSN. (rus.).
34. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 217:787-797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212
35. Mohammadhosseini H., Tahir M.M., Alrshoudi F., Alghamdi H., Alharbi Y.R., Alsaif A. et al. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101723. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101723. EDN LEWMDB.
36. Maroy K., Steeman M., Van Den Bossche N. Air flows between prefabricated insulation modules and the existing façade: A numerical analysis of the adaptation layer. *Energy Procedia*. 2017; 132:885-890. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.695
37. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 214:365-376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304
38. Eberhardt L.Ch.M., Birkved M., Birgisdottir H. Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*. 2022; 18(2):93-113. DOI: 10.1080/17452007.2020.1781588. EDN UJRDEO.
39. Teng Y., Li K., Pan W., Ng T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: A case study of a high-rise residential building in Hong Kong. *Sustainability*. 2018; 10(3):886.
40. Guerra B.C., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 170:105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617. EDN SPAAHA.
41. Fokaides P.A., Jurelionis A., Gineika A. A review of the thermal performance of vacuum insulation panels and their applications in the building sector. *Energy and Buildings*. 2014; 70:198-210.
42. Gennaro G., Favoino F., Goia F., Michele G.De., Perino M. Calibration of DSF model for real-time control. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2069:012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012027
43. Soares J., Oliveira A. Numerical simulation of a hybrid CSP/Biomass 5 MWel power plant. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1850:110014. DOI: 10.1063/1.4984488
44. Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., Goia F. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*. 2018; 179:165-182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017
45. Elghazi Y., Elshafei G. Green building envelope: A comparative analysis of vertical greenery systems and green roofs. *Alexandria Engineering Journal*. 2022; 61(9):7269-7280.
46. Campelo R.P., da Silva L.R.R. Passive façade systems for energy efficiency in buildings : a systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 157:112044.
47. Liu Z., Li J., Zhai Z.J. A review of the application of modular building in different climate zones. *Journal of Building Engineering*. 2023; 72:106652.
48. Kim D., Lee S. Bibliometric analysis of research trends in modular construction from 2010 to 2024. *Automation in Construction*. 2024; 162:105378. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105378
49. Gorse C., Johnston D., Boukhanouf R. The economic viability of passive house in challenging climates. *Energy Policy*. 2020; 147:111826.
50. Van Schilt I.M., Kwakkel J.H., Mense J.P., Verbraeck A. A simulation-based approach for reconstructing a diverse set of supply chain models with sparse data using a quality diversity algorithm. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2026; 146:103216. DOI: 10.1016/j.simpat.2025.103216. EDN JYHAZF.

Received April 26, 2026.

Adopted in revised form on April 29, 2026.

Approved for publication on May 3, 2026.

B I O N O T E S : **Kirill P. Zubarev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Associate Professor of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Senior Researcher at the Laboratory of Building Thermal Physics; **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Structural Materials, Leading Researcher of the Scientific Center

for Construction Engineering and Technologies; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ID RSCI: 831037, Scopus: 57202815810, ResearcherID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; zubarevkirill93@mail.ru;

Vyacheslav V. Kazunin — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; kvv-vyacheslav@yandex.ru;

Victor L. Dobshits — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9085-6308; 89153383886@mail.ru;

Levon G. Garanyan — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0374-7322; Levongaranyan@yandex.ru;

Mikhail V. Emelianov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 656092, Scopus: 57190730889, ResearcherID: M-1400-2014, ORCID: 0000-0002-1459-2911; Emelianov@mgsu.ru;

Maria A. Slizova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-4309-0651; ho5metown@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.009

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.6

Развитие системотехнических принципов управления при реализации реинжиниринга в строительстве

Сергей Борисович Сборщиков^{1,2}, Наталья Валерьевна Лазарева¹

¹ Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС); г. Москва, Россия;

² Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Контекст синтеза цифровизации национальной экономики и усиления влияния конвергенции на ее составляющие обуславливают усиление влияния системного подхода к организации управления, практики их перманентной трансформации, в том числе за счет формирования принципиально новых технических решений, а также качественного преобразования уже существующих. Таким подходом является реинжиниринг, который в традиционном понимании применяется для модуляции бизнес-процессов, а в новой постановке исследования — к системным решениям, которые выступают квинтэссенцией системного подхода. В такой интерпретации системное решение рассматривается как взаимосвязанная иерархическая совокупность решений. Подобная постановка исследования применительно к реинжинирингу в строительстве обозначается впервые.

Материалы и методы. Основой исследования стали системный подход и его интеграция с такими концепциями, как устойчивое развитие, логистика регулирующих воздействий, организационные изменения и трансформации. Они определили целесообразность использования методов нормативного, функционального, структурного и ретроспективного анализа. Научный поиск базировался на трудах отечественных и зарубежных ученых, представленных в списке источников.

Результаты. Идентифицирована категория «системное решение», в том числе применительно к инвестиционно-строительной сфере; определен состав системного решения, а также характер охвата им сфер общественного производства и проявления при реинжиниринге; установлены порядок и особенности формирования системного решения при реинжиниринге в строительстве.

Выводы. Использование системотехнических принципов управления при реализации реинжиниринга в строительстве позволит обеспечить хозяйствующему субъекту устойчивость в развитии, гибкость во взаимодействии с окружающей экономической средой, эффективность производства и на этом основании сформировать конкурентные преимущества и получить дополнительный эффект.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, реинжиниринг, организация, управление, системный подход, системное решение, системотехника, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Развитие системотехнических принципов управления при реализации реинжиниринга в строительстве // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.6

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валерьевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Development of Systems Engineering Principles of Management in the Implementation of Re-engineering in the Construction Industry

Sergey B. Sborschikov^{1,2}, Natalia V. Lazareva¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS); Moscow, Russian Federation;

² Research Centre for Construction; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The context of the digitalization of the national economy and the growing influence of convergence on its constituent parts are leading to an increased emphasis on a systems-based approach to management organization and the practice of their ongoing transformation, including through the development of fundamentally new technical solutions and the qualitative transformation of existing ones. This approach is re-engineering, which, in the traditional sense, is used to modulate business processes, whilst in the new research context it is applied to systemic solutions, which represent the quintessence of a systematic approach. In this interpretation, a systemic solution is viewed as an interconnected hierarchical set of solutions. This is the first time such a study has been conducted in the field of construction re-engineering.

Materials and methods. The study was based on a systematic approach and its integration with concepts such as sustainable development, the logistics of regulatory impacts, and organizational changes and transformations. These concepts de-

terminated the appropriateness of using methods of normative, functional, structural and retrospective analysis. The research drew upon the works of domestic and foreign scholars, as listed in the bibliography.

Results. The category of “system solutions” has been identified, including in relation to the investment and construction sector; the composition of a system solution has been determined, as well as the nature of its coverage of the spheres of social production and its manifestation in re-engineering; and the procedure and features of forming a system solution in construction re-engineering have been established.

Conclusions. The application of systems engineering principles of management when implementing re-engineering in the construction sector will enable a business entity to achieve sustainable development, flexibility in its interaction with the surrounding economic environment, and production efficiency; and, on this basis, to build competitive advantages and realize additional benefits.

KEYWORDS: construction, re-engineering, organization, management, systems approach, systems solution, systems engineering, life cycle

FOR CITATION: Sborschikov S.V., Lazareva M.A. Development of Systems Engineering Principles of Management in the Implementation of Re-engineering in the Construction Industry. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.6

Corresponding author: Natalia V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Контекст конвергенции цифровизации национальной экономики и усиления влияния конвергенции на ее составляющие обуславливают растущее доминирование системного подхода к организации управления, практики их перманентной трансформации, в том числе и за счет формирования принципиально новых технических решений, а также качественного преобразования уже существующих. Таким подходом является реинжиниринг, который в традиционном понимании применяется для модуляции бизнес-процессов, а в новой постановке исследования — к системным решениям, которые выступают квинтэссенцией системного подхода. В такой интерпретации системное решение рассматривается как взаимосвязанная иерархическая совокупность решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — идентификация категории «системное решение», применимость его для инвестиционно-строительной сферы (ИСС), установление специфики формирования подобных решений при реинжиниринге в рамках управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов капитального строительства (ОКС) на уровнях иерархии.

Необходимо решить следующие задачи:

1. Идентификация категории «системное решение», в том числе относительно ИСС.
2. Определение состава системного решения, охвата им сфер общественного производства и проявления при реинжиниринге.
3. Установление схем формирования системного решения при реинжиниринге в строительстве.

Осуществление намеченной цели исследования и поиска ответов на соответствующие ей задачи стали возможными за счет использования научного задела, сформированного ранними публикациями авторов [1–4], а также исследованиями отечественных и зарубежных ученых по смежной проблематике [5–25].

Методологическую основу исследования сформировали: системный подход, логистика регулирующих воздействий, управление ЖЦ, инженерный менеджмент, организация строительства. При решении конкретных задач применялись методы анализа и синтеза.

Информационную базу сформировали действующие в инвестиционно-строительной деятельности законодательные и нормативно-правовые акты, а также справочно-аналитические и реферативные материалы, отражающие конкретные практики инжиниринга и реинжиниринга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные теоретические и практические методологические принципы, а также подходы к управлению характеризуются широким разнообразием и большой вариативностью применения.

Как известно, управление в практической плоскости рассматривается как совокупность взаимосвязанных действий и процедур по достижению заданной цели, которая затем обуславливает постановку соответствующих задач. В свою очередь, они предполагают решения, называемые управленческими и состоящие из регулирующих воздействий объекта на субъект управления [1–6].

Принято подразделять регулирующие воздействия на следующие виды:

- задающие;
- возмущающие;
- управляющие;
- корректирующие.

Все эти воздействия могут быть реализованы в рамках отдельных теоретических подходов к управлению [7–11], которыми являются:

- системный подход;
- функциональный подход;
- процессный подход;
- ситуационный подход.

Наиболее прогрессивным и всеобъемлющим из приведенных концепций служит системный подход, представляющий в плоскости исследования

проектирование системотехники (системного инжиниринга) — дисциплины, охватывающей все аспекты ЖЦ сложных систем [12, 13].

В этой связи следует отметить, что сложные системы могут формироваться во всех сферах общественной жизни, в ее составляющих: общественном производстве и общественных отношениях и, соответственно, могут носить социальный, технический и антропотехнический характер в зависимости от акцента приложения [14–18]. Однако для них всех без исключения определены общие системотехнические принципы:

- 1) обоснованность — наличие законов, определяющих внутренние взаимодействия;
- 2) моделируемость — возможность упрощенного представления при помощи одной или нескольких моделей;
- 3) целенаправленность — ориентация функционирования на определенное состояние.

Приведенные принципы указывают на общие свойства сложных систем:

- 1) целостность — представление как единого объекта, состоящего из взаимосвязанных элементов (подсистем);
- 2) автономность — независимость, обособленность во временных и пространственных границах, обусловленная наличием внутренних закономерностей;
- 3) эмерджентность — наличие синергетического эффекта от объединения отдельных компонентов (подсистем) в единое целое — систему.

Принимая во внимание приведенные выше системотехнические принципы, свойства сложных систем, а также необходимость управления их ЖЦ, становится очевидной потребность в увеличении периода эффективной эксплуатации объектов воздействия, а значит получении дополнительной прибыли на этом основании.

В логике проводимого исследования в качестве подобных сложных систем, как правило антропотехнического характера, рассматриваются ИСС в целом и отдельно ее элементы, а механизмом управления их жизненным циклом представляется реинжиниринг.

Классификационные признаки, по которым можно группировать системы в строительстве, отличаются большим разнообразием и могут относиться, например, к ОКС, их комплексам, земельному участку, обеспечению функционального назначения и эксплуатации, строительному производству, организации и управлению инвестиционно-строительной деятельностью и т.д.

Тем не менее имея в качестве генезиса приведенные выше общие системотехнические принципы, условия создания и функционирования, системы ИСС будут обладать и специфическими чертами, обусловленными отраслевыми особенностями строительной продукции, уникальностью ее ЖЦ, а также

региональными условиями строительного производства и эксплуатации.

Указывая в качестве механизма управления жизненным циклом систем в строительстве реинжиниринг, а также основываясь на проведенном исследовании, в качестве основных объектов воздействия выступают технические (инженерные) решения.

В работе [4] выполнена идентификация термина «техническое решение», изучена этапность его ЖЦ, произведена привязка к отраслевым особенностям инвестиционно-строительной деятельности, установлена корреляция с этапами ЖЦ хозяйствующего субъекта. В этой связи достаточно явно проявляется сближение технического решения с научно-исследовательским, организационным, управленческим решениями, а также появляется возможность верификации основных закономерностей формирования интеграции данных решений при реинжиниринге в строительстве (рис. 1).

Основанием подобного сближения служит перманентная подвижность внешней среды и ответная реакция на эти флуктуации внутренней среды антропотехнической системы. Динамизм обстановки определен множественными экономическими явлениями, что, в свою очередь, указывает на разные причины и условия воздействия на инженерные (технические) решения, это:

- научно-технические факторы;
- социальные факторы;
- экономические, финансовые факторы;
- производственные, технологические факторы;
- правовые, законодательные, нормативные факторы;
- природные, географические факторы.

При идентификации методологии общего исследования автора публикации [4] в качестве предметов реинжиниринга установлены:

- материальные объекты, к которым относятся здания, сооружения, их комплексы, земельные участки;
- нематериальные объекты, в их качестве рассматриваются процессы (управленческие, технологические), организационные структуры.

В обоих случаях основу указанных объектов составляют инженерные решения, которые под воздействием факторов внешней и внутренней среды изменяют свое состояние.

Для материальных объектов и соответственно для инженерных решений, их формирующих, изменение состояния будет характеризоваться износом и внешним (экономическим) устареванием. В свою очередь, износ, по причинам его вызвавших, принято делить на физический и моральный.

Физический износ — это ухудшение, потеря физико-механических свойств в процессе эксплуатации материального объекта или по естественным причинам его деградации. Категория физического

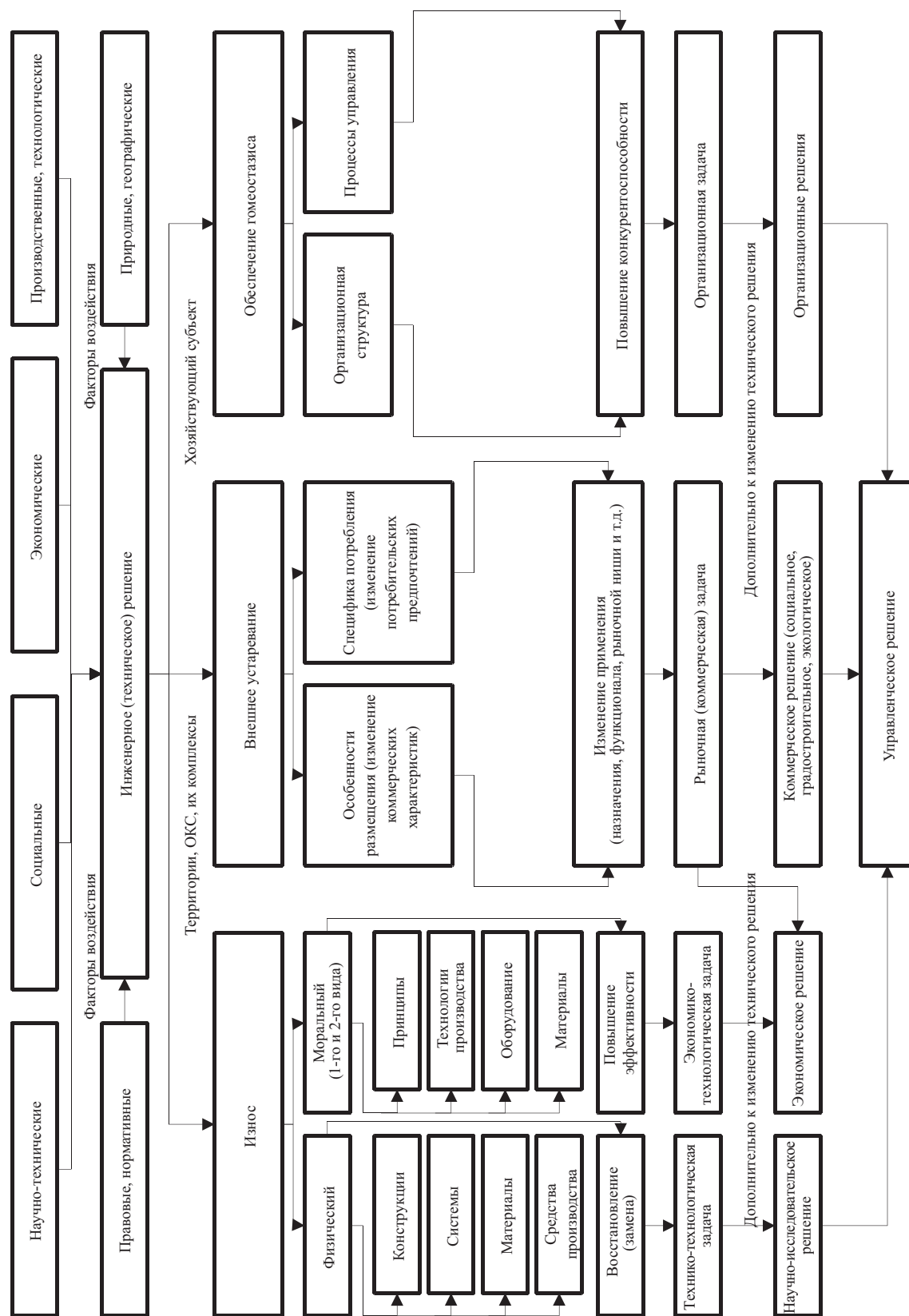


Рис. 1. Схема формирования решений при реинжиниринге в строительстве

износа регламентирована и закреплена в существующей нормативно-методической базе строительства¹.

Физическому износу подвержены строительные конструкции, материалы, инженерные системы и оборудование, а также средства производства, используемые для возведения зданий, сооружений, технического обслуживания и ремонта в процессе их эксплуатации.

Подвергнутые физическому износу материальные объекты, их элементы можно восстановить или частично заменить до первоначального состояния, либо до определенного уровня, который делает возможным дальнейшую эксплуатацию объекта безопасной и комфортной. Следовательно, предпринимая меры по восстановлению объектов или замене физически изношенных их частей, необходимо решить технико-технологическую задачу, которая связана с поиском и обоснованием подходящих технологий восстановления (ремонта), использованием соответствующей им техники [19–21].

Приспособление новых технологий и новых материалов для восстановления существующих и овеществленных инженерных решений, в том числе замены их отдельных составляющих, без изменения основных характеристик и назначения объекта носит, помимо прочего, научно-технический характер (требует некоторых видов НИОКР), т.е. предполагает дополнительное научно-исследовательское решение.

Равным образом с физическим износом моральный износ также нормативно зафиксирован и идентифицирован² как постепенное (во времени) отклонение эксплуатационных показателей от современного уровня технических требований эксплуатации зданий и сооружений.

В экономической интерпретации моральный износ рассматривается как уменьшение стоимости основных фондов вследствие изменения потребительского спроса, а также развития науки и техники (научно-технического прогресса — НТП). Исходя из этого принято выделять две формы морального износа применительно к ОКС.

Первая форма морального износа ОКС связана с уменьшением его стоимости в текущем моменте по сравнению с периодом проектирования и строительства.

Вторая форма морального износа ОКС определяется необходимостью дополнительных затрат для приведения зданий и сооружений к современным требованиям (нормативным, потребительским).

¹ ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : введ. в действ. Приказом Росстандарта от 27.12.2012 № 1984-ст, п. 3.25.

² ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : введ. в действ. Приказом Росстандарта от 27.12.2012 № 1984-ст, п. 3.24.

Следовательно, моральный износ связан с изменениями в принципах проектирования, строительства и эксплуатации ОКС, технологии их возведения, вызван появлением нового оборудования, новых материалов.

Для преодоления подобной экономико-технологической задачи требуется решение, увязанное с повышением отдачи (эффективности) ОКС при эксплуатации, предполагающее комплекс мероприятий в этом направлении, которые имеют, в первую очередь, экономико-финансовое обоснование.

Отталкиваясь от приведенного выше, можно констатировать, что для физического и морального видов износа побудительными силами являются научно-технический прогресс и его производная (деприват) технологическая конвергенция. В подобной логике можно утверждать, что социальная и территориальная конвергенция определяют внешнее устаревание материального объекта, а организационная конвергенция вызывает ответную реакцию на флуктуации внешней среды, обеспечивающую таким образом гомеостазис системы, в качестве которой рассматривается экономическая единица — инвестиционно-строительный проект и т.д.

Внешнее устаревание материального объекта верифицируется потерей в его стоимости из-за влияния внешних взаимосвязанных факторов [22–25], обусловленных:

- принципами территориального планирования и зонирования населенных пунктов;
- потребительскими предпочтениями.

Как следствие модулирования указанных факторов возможна корректировка эксплуатации ОКС, например изменение его назначения, функционала, рыночной ниши и т.д. Вероятнее всего, подобная коррекция — это результат зональной трансформации населенного пункта и, следовательно, изменения зональной принадлежности ОКС, что может повлечь несоответствие с первоначальным назначением объекта. Исправление подобного рода нестыковки составляет суть рыночной (коммерческой) задачи, решением которой могут быть мероприятия широкого спектра воздействия, носящие градостроительный, социальный, экологический и иной характер.

Обозначая в качестве предмета реинжиниринга в том числе нематериальные объекты, необходимо указать их легкость в трансформации, большую подвижность в реакции на воздействия, скорость подобного отклика, меньшую трудоемкость и потребность в материально-технических ресурсах относительно реинжиниринга материальных объектов.

Однако воздействия в данном ключе на нематериальные объекты имеют непреложное значение и во многом определяют положение хозяйствующего субъекта во внешней среде, а также характер взаимодействия с другими участниками рыночной экономики.

В этой связи на основании работы [4] можно указать, что реинжиниринг нематериальных объектов направлен на обеспечение гомеостаза определенной экономической единицы, который достигается за счет воздействий и трансформаций организационной структуры, а также процессов управления.

Гомеостазис в проводимом исследовании трактуется как способность открытой системы поддерживать динамическое равновесие и внутреннее единство при помощи регулирующих воздействий.

Таким образом, обеспечение гомеостаза направлено на повышение конкурентоспособности хозяйствующего субъекта путем формирования как фактических, так и потенциальных конкурентных преимуществ за счет внутренней трансформации системы управления, что представляет собой организационную задачу, допускающую одноименное решение.

Являясь объектом воздействия факторов внешней среды, инженерные (технические) решения конвертируют их во внутренней среде системы в смежные, сопряженные предметные области, достигая при этом дополнительно к изменению технического решения результатов, лежащих в различных проекциях. Такими проекциями могут быть:

- научно-исследовательское решение;
- экономическое решение;
- коммерческое решение;
- организационное решение.

В свою очередь, данные решения имеют свою собственную группировку и иерархию.

Но, тем не менее, преобразование технического решения и соответствующих ему проекций требует регулирующих воздействий, которые могут интегрировать сопряженные с техническим решением в единый формат — управленческое решение.

Из приведенного выше видно, что все решения взаимосвязаны, имеют явную иерархию, охватывают широкий спектр управленческих мероприятий. Данная интеграция, обнаруживая свойства сложных систем и соответственно подчиняясь общим системно-техническим принципам при описании формирования решений в рамках реинжиниринга в строительстве, позволяет рассматривать ее как отдельную, самостоятельную категорию — системное решение или систему решений.

Системное решение (система решений) — взаимосвязанная совокупность инженерного (технического) и сопряженных с ним решений второго порядка, определяющее построение, функционирование системы, а также взаимодействие ее с другими системами.

Системное решение затрагивает все аспекты управления и преобразования антропотехнической системы и попадает в предметную область исследования системного инжиниринга (рис. 2). Необходимо отметить, что цели системного инжиниринга и реин-

жиниринга имеют полную сходимость, а именно относительно объекта управления это:

- оптимизация;
- обеспечение эффективности;
- снижение рисков.

Основным элементом в составе системного решения является его инженерная (техническая) составляющая, которая испытывает входное воздействие при реинжиниринге. Инженерное решение — это объект промышленного инжиниринга, цели которого детализируют целеполагание системного инжиниринга касательно качества продукции (услуги), производительности основного производства, его затрат, условий труда.

Дальнейшая декомпозиция целеполагания возможна по сферам деятельности хозяйствующего субъекта и обуславливает формирование элементов второго порядка системного решения, которые, в свою очередь, представляют собой объекты функционального инжиниринга. С одной стороны, данные элементы допускают собственную декомпозицию, а с другой наблюдается их сближение, и они формируют результирующий элемент — управленческое решение, являющееся предметом управленческого инжиниринга (бизнес-инжиниринга). Ввиду этого целеполагание управленческого инжиниринга направлено на совершенствование, оптимизацию, трансформацию бизнес-процессов и бизнес-структуры, что соответствует целям реинжиниринга и в итоге собственной реализации, образует выходное воздействие в рассматриваемой конфигурации.

Кроме видовой декомпозиции, системное решение в своем составе имеет подчиненные функциональные элементы, которым соответствует определенный набор характеристик (рис. 3).

Системное решение находится во взаимодействии с другими системными решениями, при этом каждое из них обнаруживает одинаковые функциональные элементы, что обеспечивает их валидацию в рамках исследуемых антропотехнических систем. В качестве таких функциональных элементов выделены:

- 1) состав;
- 2) ресурсы;
- 3) жизненный цикл;
- 4) воздействия.

В указанной группировке состав системного решения верифицируется видовой декомпозицией, которая была приведена выше. И как уже определено, характеризуется в каждом конкретном случае связями подчинения, формирующими иерархию, и связями сопряжения, обеспечивающими внутренние взаимодействия и устанавливающими их особенности.

Любое достижение цели, всякое решение задачи требует ресурсов (материальных, технических, трудовых), которые выражаются номенклатурой (применительно к трудовым ресурсам — профессионально-квалификационным составом), объемом (применительно к трудовым ресурсам — количе-

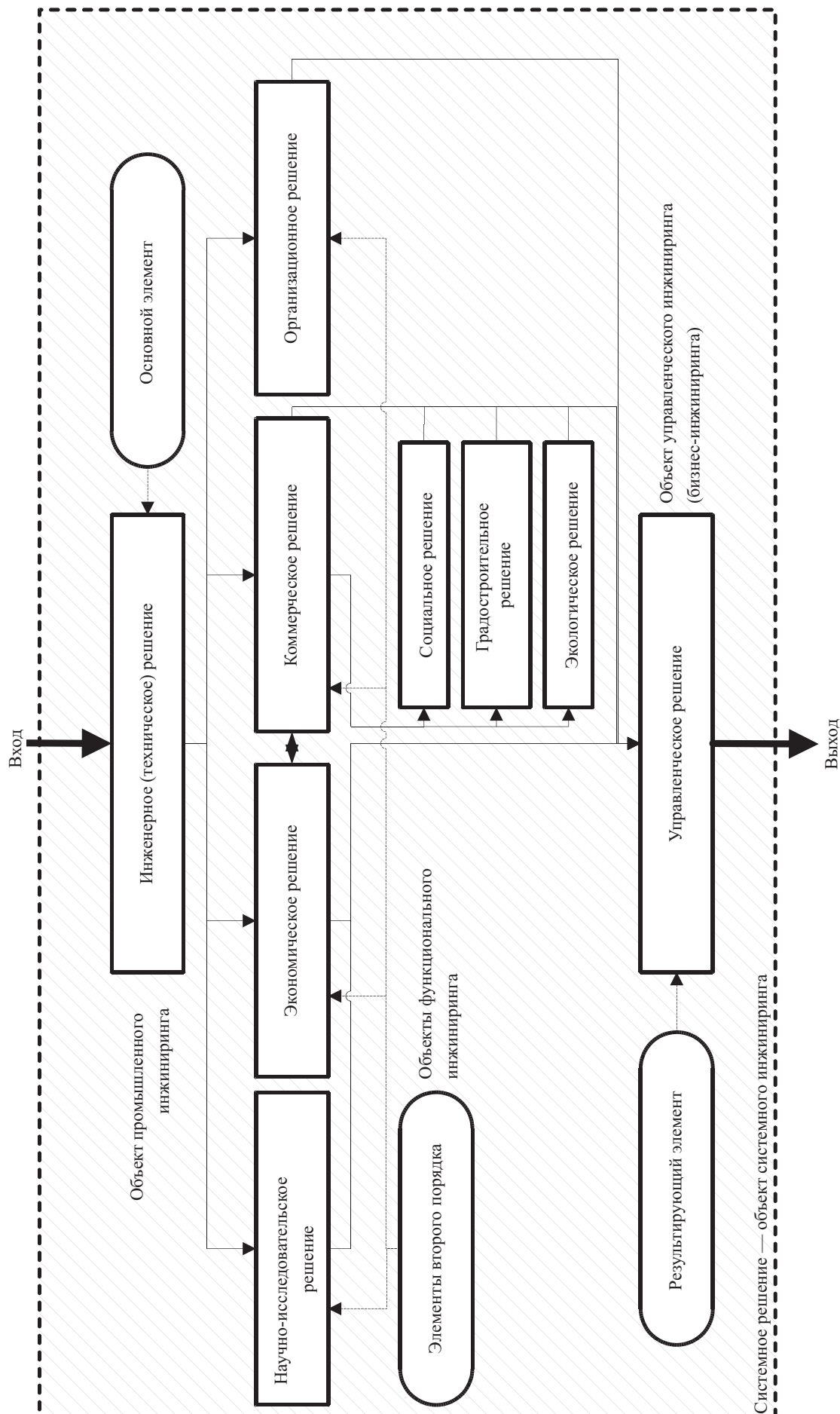


Рис. 2. Состав системного решения

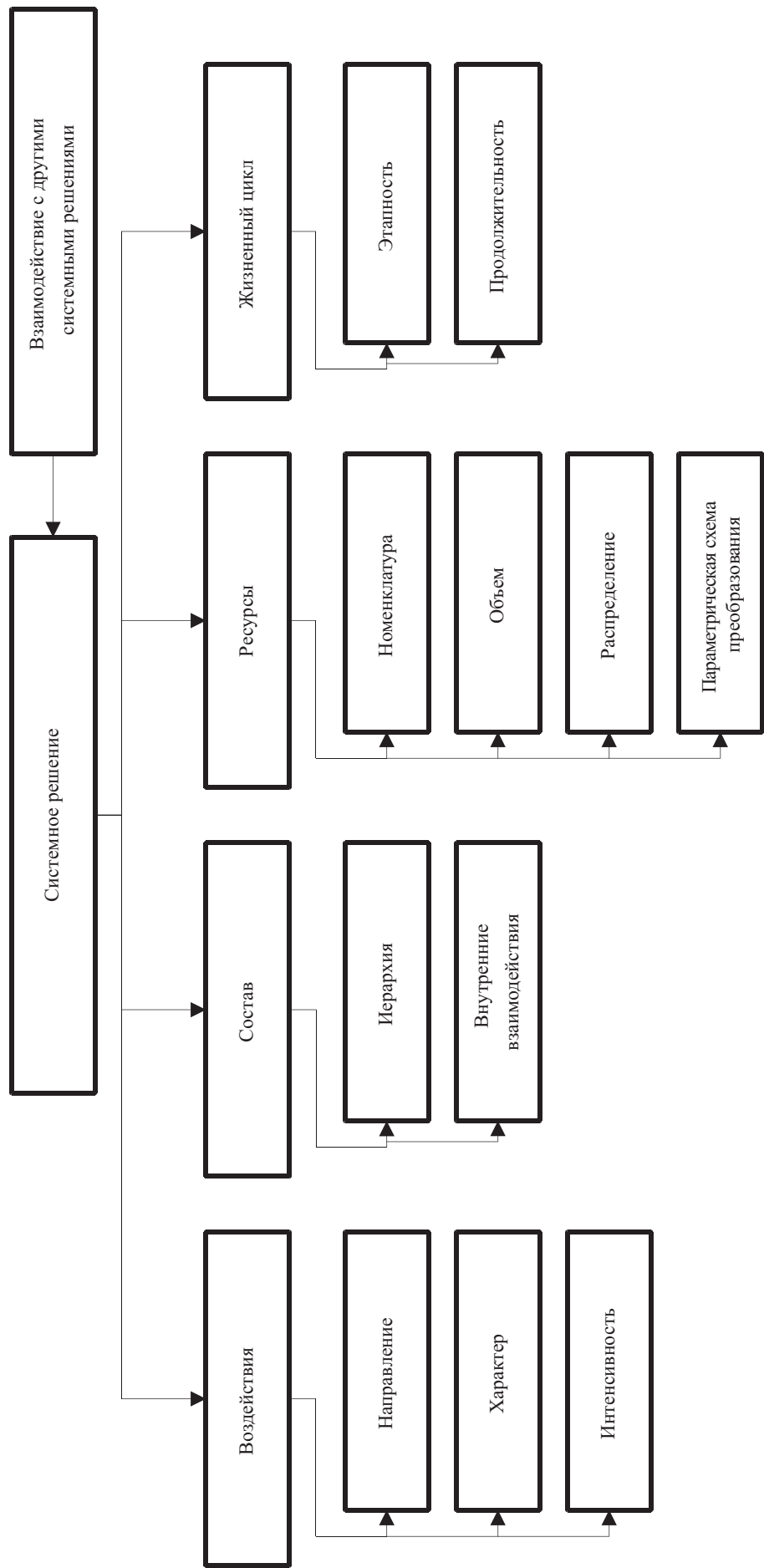


Рис. 3. Основные функциональные элементы и характеристики системного решения

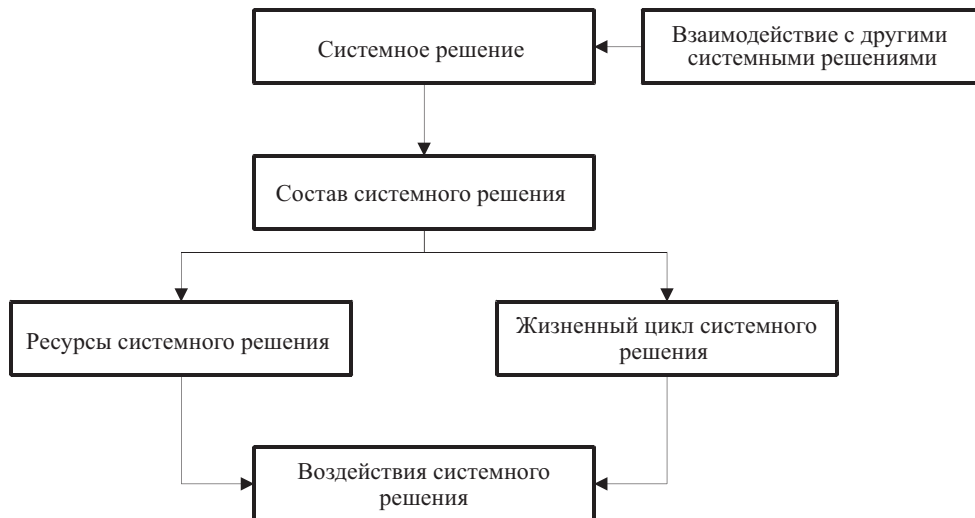


Рис. 4. Схема сложения элементов в общей структуре системного решения

ством) и их распределением во времени и по составляющим элементам.

В процессе реализации решения, достижения намеченного результата происходит потребление ресурсов или их преобразование по определенной схеме, которая обусловлена методом (технологией) воздействия и описывается некоторой совокупностью параметров. Параметрическая схема преобразования ресурсов может быть представлена в различном формате, например комплект чертежей, конструкторская и проектная документация, бизнес-план и т.д.

Системное решение имеет свой ЖЦ, который во многом определяет жизненный цикл инженерной составляющей. Остальные решения, входящие в состав системного, также обладают своими временными характеристиками, способными усилить или ослабить параметры ЖЦ инженерного решения и соответствующим образом повлиять на жизненный цикл системного решения. Имея каждый свою продолжительность, составляющие отличаются, помимо прочего, этапностью осуществления, например, могут реализовываться параллельно, последовательно, с определенным лагом.

Принятие и реализация решения всегда обусловлены воздействием субъекта управления на объект, т.е. задается направление, также ему присущи некий характер и некоторая интенсивность, связанные с используемыми методами управления и спецификой организации данной антропотехнической системы.

Приведенные функциональные элементы обладают определенным влиянием друг на друга, что проявляется в последовательности их идентификации в рамках системного решения (рис. 4), такая же закономерность сложения наблюдается и при его преобразовании — реинжиниринге.

Как было установлено выше, системное решение имеет как видовую, так и функциональную декомпозицию, отличающиеся в качественном и количественном отношении в каждом конкретном

случае. Подобные различия определяют расхождение в ресурсообеспечении, а также характере ЖЦ того или иного системного решения и, как следствие, требуют отдельного подхода к формированию и реализации воздействия на объект управления.

На основе изложенного можно считать установленной фактическую имплементацию основополагающих принципов системотехники в теоретические и практические основы реинжиниринга. Предложенные авторами категория «системное решение» и ее трактование допускают широкое применение в различных сферах научного познания, способствуют расширению спектра и горизонта исследований за счет взаимного обогащения методологического аппарата рассматриваемых предметных областей. Использование этой категории в методологии реинжиниринга усиливает гносеологические аспекты системного подхода к управлению, а именно устанавливает конвергенционные основы развития экономических систем за счет взаимовыгодного сближения и обоюдного проникновения ее базовых подсистем и элементов.

Решение, лежащее в основе системы, может принадлежать к одному из характерных случаев, определяющихся отношением к общественному производству (рис. 5):

- 1) материальной сфере;
- 2) нематериальной сфере;
- 3) материальной и нематериальной сферам.

Рассматривая реинжиниринг в контексте подобного развития системотехнических принципов в управлении, можно определить его развернутое и углубленное приложение в системе общественного производства. Развивая как производительные силы (предметы, средства и технологии производства), так и производственные отношения, связанные с организационными формами (специализацией и кооперацией), реинжиниринг на макроэкономическом уровне обеспечивает расширенное воспроизводство,

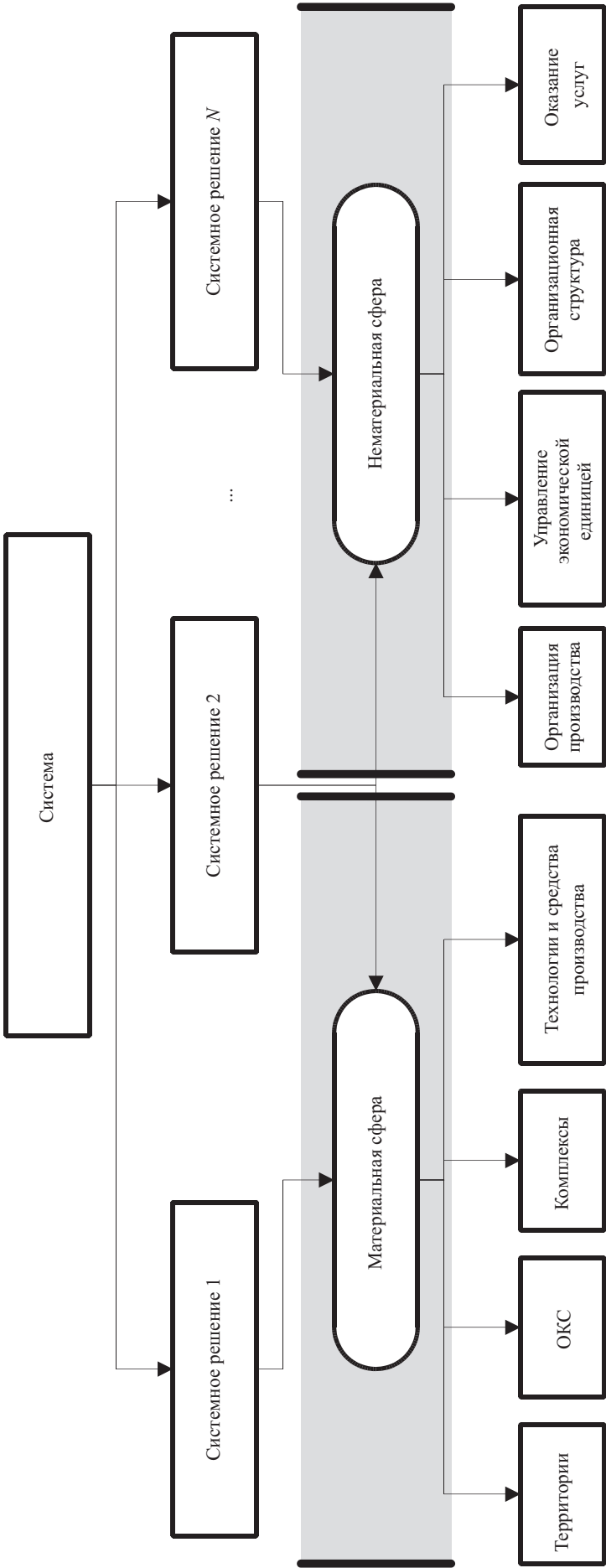


Рис. 5. Охват системным решением сфер общественного производства

основным фактором которого является научно-технический прогресс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе вышеприведенного можно констатировать, что методические положения идентификации системного решения и его использования при реинжиниринге в строительстве способствуют: 1) эффективному управлению ЖЦ как материальных, так и нематериальных объектов за счет их ка-

чественной трансформации; 2) повышению качества строительной продукции, снижению стоимости и продолжительности ее возведения. Таким образом, системотехнические принципы управления при реализации реинжиниринга в строительстве позволяют обеспечить хозяйствующему субъекту устойчивость в развитии, гибкость во взаимодействии с окружающей экономической средой, эффективность производства и на этом основании сформировать конкурентные преимущества и получить дополнительный эффект.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сборщиков С.Б.* Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере (теория, методология, практика) : дисс. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 361 с. EDN QGBVJV.
2. *Журавлев П.А., Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В.* Комплекс организационно-нормативных мер по совершенствованию систем управления инвестиционно-строительной деятельности на основе реинжиниринга // *Инновации и инвестиции*. 2026. № 2. С. 59–62. EDN DODQIU.
3. *Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В.* Теоретико-методологические положения концепций управления изменениями и реинжиниринга, перспективы их интеграции: отличие и сходимость // *Экономика промышленности*. 2026. Т. 19. № 1. С. 59–69. DOI: 10.17073/2072-1633-2026-1-1518. EDN ZBQVMVG.
4. *Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В.* Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 11. С. 1824–1834. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1824-1834. EDN EUMLUQ.
5. *Журавлев П.А.* Системные решения в реинжиниринге территорий и застройки // *Экономика промышленности*. 2025. Т. 18. № 4. С. 499–504. DOI: 10.17073/2072-1633-2025-4-1522. EDN OSPAYN.
6. *Журавлев П.А.* Система нормативно-методического обеспечения принятия организационно-технологических решений при реконструкции и реновации зданий и сооружений : дисс. ... канд. техн. наук. 2015. 224 с. EDN UHTWWH.
7. *Митенков А.В., Елисеева Е.Н.* Эволюция инновационных экосистем и трансформация бизнеса // *Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ)*. Серия: Социально-экономические науки. 2024. Т. 17. № 2. С. 154–165. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-2-154-165. EDN EXRBOL.
8. *Митенков А.В.* Рождение метавселенной и предпосылки трансформации управления в организации: экоаспект // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2024. № 4. С. 56–62. EDN XELKPN.
9. *Митенков А.В.* К вопросу методологии управления трансформациями: модель синго // *Вестник Удмуртского университета*. Серия Экономика и право. 2024. Т. 34. № 4. С. 652–659. DOI: 10.35634/2412-9593-2024-34-4-652-659. EDN XUTVLE.
10. *Малахов В.И.* Современные технологии управления в строительстве // *Экономика*. 2018. № 1. С. 10–11.
11. *Малахов В.И.* ИСИ-30. Классификация строительных проектов // *СамоВод*. 2021.
12. *Чельшиков П.Д., Волков А.А., Давыдов А.Е.* Цифровая система управления жизненным циклом объектов капитального строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 2. С. 10–19. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.02.10-19. EDN NFJCNH.
13. *Волков А.А., Каган П.Б., Афанасьева А.А.* Строительство в условиях развития цифровой экономики // *Системотехника строительства*. Киберфизические строительные системы – 2019 : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 63–67. EDN FJGPCH.
14. *Лейбман Д.М.* Организация строительства технически сложных объектов // *Нормирование и оплата труда в строительстве*. 2018. № 5. С. 64–73. EDN YGZNBG.
15. *Leybman D., Khripko T.* Quality assurance program of a nuclear facility // *E3S Web of Conferences*. 2019. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015. EDN ZWVUYJ.
16. *Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А.* Инжиниринг как основа модернизации строительной отрасли // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании* : сб. мат. VI Междунар. науч. конф. 2018. С. 162–166. EDN YQGTVB.
17. *Шинкарева Г.Н.* Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2018. EDN XJZLZQ.
18. *Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А.* Комплексный инжиниринг как способ интенсификации строительного производства // *Нормирование и оплата труда в строительстве*. 2018. № 3. С. 37–41. EDN QIPUEW.
19. *Жаров Я.В.* Организационно-технологическое проектирование в строительстве на основе интеллектуального блока планирования // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 6 (77). С. 193–199.

DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ.

20. Жаров Я.В. Информационное моделирование строительства на основе блочнокластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.

21. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101. EDN MFGKEQ.

22. Попков А.Г. Реализация комплексных логистических решений корпорации «Единого заказчика»: на примере строительной отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5–1. С. 324–328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR.

23. Попков А.Г. Организация прогнозирования логистических процессов в строительстве // Экономика и предпринимательство. 2019. № 2 (103). С. 779–781. EDN BZAZYK.

24. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle // Строительство — формирование среды жизнедеятельности: сб. мат. семинара молодых ученых XXV Междунар. науч. конф. 2022. С. 115–120. EDN XSOQZK.

25. Sborshikov S., Vvedenskiy R., Markova I. Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities // E3S Web of Conferences. 2021. P. 02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302047. EDN HBQVXX.

Поступила в редакцию 17 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Борисович Сборщиков — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного менеджмента; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС); 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; главный научный сотрудник, дирекция научно-технических проектов и экспертиз; Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; tous2004@mail.ru;

Наталья Валерьевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного менеджмента; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС); 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; tous2004@mail.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, научное редактирование, итоговые выводы.

Лазарева Н.В. — обработка материала, проведение исследования, доработка текста и описание результатов, формулирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The context of the convergence of the digitalization of the national economy and the growing influence of this convergence on its constituent parts are driving the increasing dominance of a systems-based approach to organizational management and the practice of their ongoing transformation, including through the development of fundamentally new technical solutions and the qualitative transformation of existing ones. One such approach is re-engineering, which, in the traditional sense, is applied to the optimization of business processes, but in this new research framework is applied to systemic solutions, which represent the quintessence of the systemic approach. In this interpretation, a systemic solution is regarded as an interconnected, hierarchical set of solutions.

MATERIALS AND METHODS

The aim of the study is to identify the category of “systemic solution”, assess its applicability to the in-

vestment and construction sector (ICS), and establish the specific characteristics of how such solutions are formed during re-engineering within the framework of life-cycle management (LCM) of capital construction projects (CCP) at various hierarchical levels.

The following tasks need to be addressed:

1. To identify the category of “systemic solution”, including in relation to the ICS.

2. To define the composition of a systemic solution, the scope of public production sectors it covers, and its manifestation during re-engineering.

3. To establish frameworks for the formation of a system solution during re-engineering in the construction sector.

Achieving the intended research objective and finding answers to the corresponding tasks was made possible by drawing on the scientific groundwork laid by the authors’ earlier publications [1–4], as well as research by domestic and foreign scholars on related topics [5–25].

The methodological basis of the research was formed by: a systems approach, the logistics of regulatory interventions, life-cycle management, engineering management, and construction organization. Methods of analysis and synthesis were applied in solving specific problems.

The information base was compiled from the legislative and regulatory acts governing investment and construction activities, as well as reference, analytical and abstract materials reflecting specific engineering and re-engineering practices.

RESEARCH FINDINGS

Contemporary theoretical and practical methodological principles, as well as approaches to management, are characterized by a wide variety and considerable variability in their application.

As is well known, management in practice is regarded as a set of interrelated actions and procedures aimed at achieving a specified objective, which in turn determines the formulation of corresponding tasks. In turn, these involve decisions known as managerial decisions, which consist of regulatory influences exerted by the object upon the subject of management [1–6].

It is customary to classify regulatory influences into the following types:

- prescriptive;
- disturbing;
- control;
- corrective.

All these influences can be implemented within the framework of specific theoretical approaches to management [7–11], namely:

- the systems approach;
- the functional approach;
- the process approach;
- the situational approach.

The most progressive and comprehensive of these concepts is the systems approach, which, in the context of research, represents a projection of systems engineering — a discipline encompassing all aspects of the life cycle of complex systems [12, 13].

In this regard, it should be noted that complex systems can emerge in all spheres of social life and its constituent parts: social production and social relations; and, accordingly, may be of a social, technical or anthropotechnical nature, depending on the focus of their application [14–18]. However, common systems engineering principles apply to all of them without exception:

- 1) validity — the existence of laws governing internal interactions;
- 2) modelability — the possibility of simplified representation using one or more models;
- 3) purposefulness — the orientation of functioning towards a specific state.

These principles point to the general properties of complex systems:

- 1) integrity — representation as a single entity consisting of interconnected elements (subsystems);
- 2) autonomy — independence and isolation within temporal and spatial boundaries, determined by the presence of internal laws;
- 3) emergence — the presence of a synergistic effect resulting from the combination of individual components (subsystems) into a single whole — a system.

Taking into account the above-mentioned systems engineering principles, the properties of complex systems, and the need to manage their life cycle, there is a clear need to extend the period of effective operation of the objects under consideration, and thus to generate additional profit on this basis.

In the context of this study, information and communication systems (ICS) — both as a whole and their individual components — are regarded as such complex systems, typically of an anthropotechnical nature, whilst re-engineering is presented as the mechanism for managing their life cycle.

The classification criteria by which systems in the construction sector can be grouped are highly diverse and may relate, for example, to building complexes, their associated facilities, the site, the fulfilment of functional requirements and operation, construction works, the organization and management of investment and construction activities, and so on.

Nevertheless, whilst rooted in the general systems engineering principles, conditions of creation and functioning outlined above, ICS systems will also possess specific characteristics determined by the sector-specific features of construction products, the uniqueness of their life cycle, and the regional conditions of construction and operation.

By identifying re-engineering as the mechanism for managing the life cycle of systems in the construction sector, and based on the research conducted, technical (engineering) solutions are identified as the primary objects of intervention.

In [4], the term “technical solution” is defined, the stages of its life cycle are examined, a link is established with the sector-specific characteristics of investment and construction activities, and a correlation is identified with the life cycle stages of a business entity. In this regard, there is a clear convergence between technical solutions and those relating to research, organization and management; furthermore, this opens up the possibility of verifying the fundamental principles governing the integration of these solutions during re-engineering in the construction industry (Fig. 1).

The basis for this convergence lies in the constant fluidity of the external environment and the internal environment’s response to these fluctuations within the anthropotechnical system. The dynamic nature of the situation is determined by a multitude of economic phenomena,

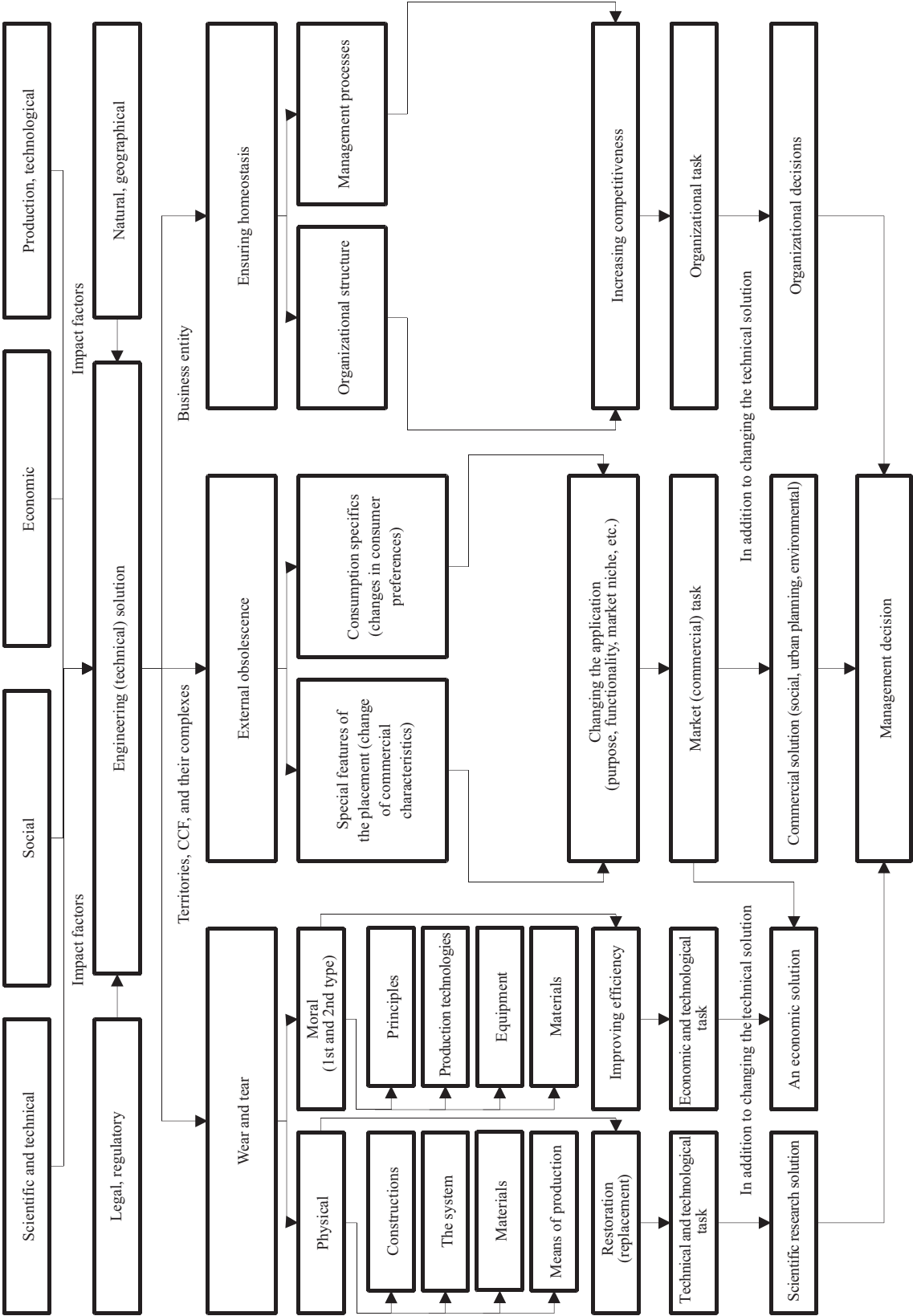


Fig. 1. Diagram illustrating the formation of decisions during re-engineering in the construction sector

which, in turn, point to various causes and conditions influencing engineering (technical) solutions, namely:

- scientific and technical factors;
- social factors;
- economic and financial factors;
- production and technological factors;
- legal, legislative and regulatory factors;
- natural and geographical factors.

In identifying the methodology of the general study, the author of publication [4] has identified the following as subjects for re-engineering:

- tangible objects, which include buildings, structures, their complexes and plots of land;
- intangible objects, which include processes (managerial, technological) and organizational structures.

In both cases, these objects are underpinned by engineering solutions, which change their state under the influence of external and internal environmental factors.

For tangible assets — and, consequently, for the engineering solutions that constitute them — changes in condition are characterized by wear and tear and external (economic) obsolescence. In turn, wear and tear is conventionally divided into physical and obsolescence-related categories, depending on the causes.

Physical wear and tear refers to the deterioration or loss of physical and mechanical properties that occurs during the use of a physical object or as a result of its natural degradation. The concept of physical wear and tear is regulated and enshrined in the existing regulatory and methodological framework for the construction industry¹.

Building structures, materials, engineering systems and equipment, as well as the means of production used for the construction of buildings and structures, and for their maintenance and repair during operation, are subject to physical wear and tear.

Physical assets and their components that have been subject to wear and tear can be restored or partially replaced to their original condition, or to a certain standard that enables the continued safe and comfortable operation of the asset. Consequently, when undertaking measures to restore objects or replace their physically worn-out parts, it is necessary to address a technical and technological challenge involving the identification and justification of suitable restoration (repair) technologies, and the use of the corresponding equipment [19–21].

The adaptation of new technologies and new materials for the restoration of existing and materialized engineering solutions, including the replacement of their individual components, without altering the facility's fundamental characteristics and purpose, is, amongst other things, of a scientific and technical nature (requir-

ing certain types of R&D), i.e. it entails an additional research-based solution.

Similarly, to physical depreciation, obsolescence is also defined in regulatory terms and identified² as a gradual (over time) deviation of operational performance from the current level of technical requirements for the operation of buildings and structures.

In economic terms, obsolescence is regarded as a reduction in the value of fixed assets resulting from changes in consumer demand, as well as from developments in science and technology (scientific and technological progress — STP). On this basis, it is customary to distinguish between two forms of obsolescence as they apply to CCP.

The first form of obsolescence of buildings and structures relates to a reduction in their current value compared with the period of design and construction.

The second form of obsolescence of buildings and structures is determined by the need for additional expenditure to bring them into line with current requirements (regulatory and consumer-related).

Consequently, obsolescence is linked to changes in the principles of design, construction and operation of the building stock, as well as in the technology used in their construction, driven by the emergence of new equipment and new materials.

To address such an economic and technological challenge, a solution is required that is linked to improving the performance (efficiency) of civil engineering structures during operation, involving a set of measures in this direction which are, first and foremost, economically and financially justified.

Based on the above, it can be stated that the driving forces behind both physical and obsolescence-related wear and tear are scientific and technological progress and its derivative — technological convergence. Following this line of reasoning, it can be argued that social and territorial convergence determine the external obsolescence of a physical object, whilst organizational convergence triggers a response to fluctuations in the external environment, thereby ensuring the homeostasis of the system, which is regarded as an economic unit — such as an investment and construction project, etc.

The external obsolescence of a physical asset is verified by a loss in its value due to the influence of external interrelated factors [22–25], determined by:

- the principles of spatial planning and zoning of settlements;
- consumer preferences.

As a result of the modulation of these factors, adjustments to the operation of the CCP may be made, for example, a change in its purpose, functionality, market niche, etc. Most likely, such an adjustment is the result

¹ GOST 31937–2011. Buildings and structures. Rules for the inspection and monitoring of technical condition: brought into force by Order of Rosstandart No. 1984-st of 27 December 2012, clause 3.25.

² GOST 31937–2011. Buildings and structures. Rules for the inspection and monitoring of technical condition: brought into force by Order of Rosstandart No. 1984-st of 27 December 2012, clause 3.24.

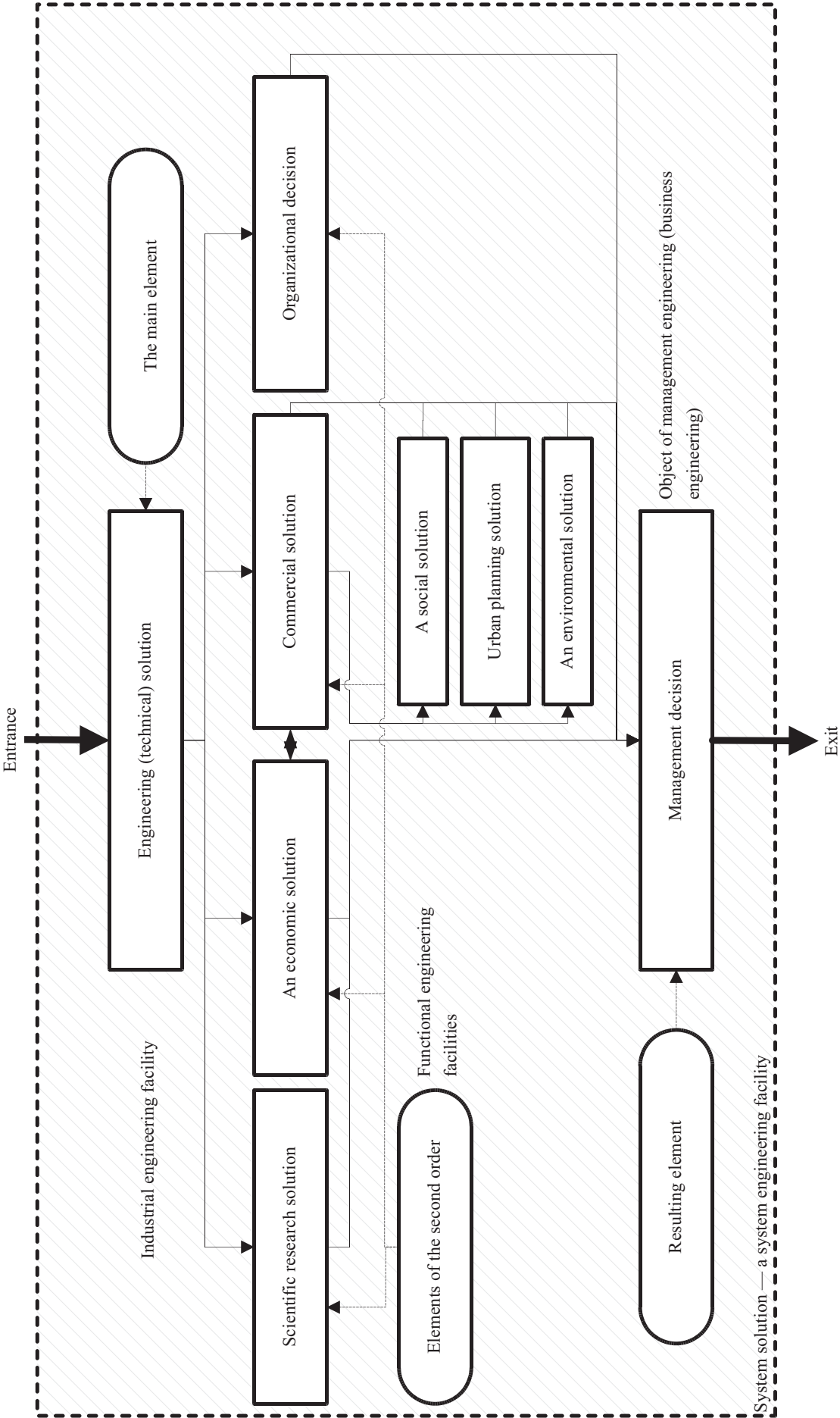


Fig. 2. Components of a system solution

of a zonal transformation of the settlement and, consequently, a change in the zonal classification of the CCP, which may lead to a mismatch with the facility's original purpose. Rectifying this kind of inconsistency is the essence of a market (commercial) challenge, the solution to which may involve a wide range of measures of an urban planning, social, environmental and other nature.

When identifying intangible assets as subjects for re-engineering, it is necessary to highlight their ease of transformation, greater flexibility in responding to external influences, the speed of such responses, and the fact that they require less labour and fewer material and technical resources compared to the re-engineering of tangible assets.

However, such influences on intangible objects are of paramount importance and largely determine the position of an economic entity within its external environment, as well as the nature of its interaction with other participants in the market economy.

In this regard, based on the work in [4], it can be noted that the re-engineering of intangible assets is aimed at ensuring the homeostasis of a particular economic entity, which is achieved through interventions and transformations of the organizational structure, as well as management processes.

In this study, homeostasis is interpreted as the ability of an open system to maintain dynamic equilibrium and internal unity through regulatory interventions.

Thus, ensuring homeostasis is aimed at enhancing the competitiveness of an economic entity by creating both actual and potential competitive advantages through the internal transformation of the management system; this constitutes an organizational task that admits a solution of the same name.

As the object of influence from external environmental factors, engineering (technical) solutions convert these factors within the system's internal environment into adjacent, related subject areas, thereby achieving, in addition to changes in the technical solution, results that lie within various projections. Such projections may include:

- a research and development solution;
- an economic solution;
- a commercial solution;
- an organizational solution.

In turn, these solutions have their own classification and hierarchy.

Nevertheless, the transformation of a technical decision and its corresponding projections requires regulatory measures that can integrate the elements associated with the technical decision into a single format — a management decision.

It is clear from the above that all decisions are inter-related, have a clear hierarchy, and cover a wide range of management activities. This integration, by revealing the properties of complex systems and, accordingly, adhering to general systems engineering principles when

describing the formation of decisions within the framework of re-engineering in construction, allows it to be regarded as a separate, independent category — a systems solution or a system of solutions.

A systemic solution (system of solutions) is an interconnected set of engineering (technical) solutions and associated second-order solutions that determine the structure and operation of a system, as well as its interaction with other systems.

A system solution encompasses all aspects of the management and transformation of an anthropotechnical system and falls within the scope of systems engineering research (Fig. 2). It should be noted that the objectives of systems engineering and re-engineering are entirely congruent; specifically, with regard to the object of control, these are:

- optimization;
- ensuring efficiency;
- risk reduction.

The main element of a system solution is its engineering (technical) component, which is subject to input influences during re-engineering. An engineering solution is an object of industrial engineering, the objectives of which specify the goals of systems engineering with regard to product (service) quality, core production output, production costs and working conditions.

Further decomposition of these objectives is possible according to the business entity's areas of activity and leads to the formation of second-order elements of the system solution, which, in turn, constitute objects of functional engineering. On the one hand, these elements can be broken down further; on the other hand, they converge to form a resulting element — a management decision — which is the subject of management engineering (business engineering). In view of this, the objectives of management engineering are directed towards the improvement, optimization, and transformation of business processes and business structures, which corresponds to the objectives of re-engineering and, ultimately, through its own implementation, produces the output effect in the configuration under consideration.

In addition to its structural decomposition, the system solution comprises subordinate functional elements, each of which corresponds to a specific set of characteristics (Fig. 3).

The system solution interacts with other system solutions, with each of them exhibiting the same functional elements, which ensures their validation within the framework of the anthropotechnical systems under investigation. The following functional elements have been identified:

- 1) composition;
- 2) resources;
- 3) life cycle;
- 4) impacts.

Within this grouping, the composition of the system solution is verified by the typological decomposition outlined above. And, as already defined, it is characterized in

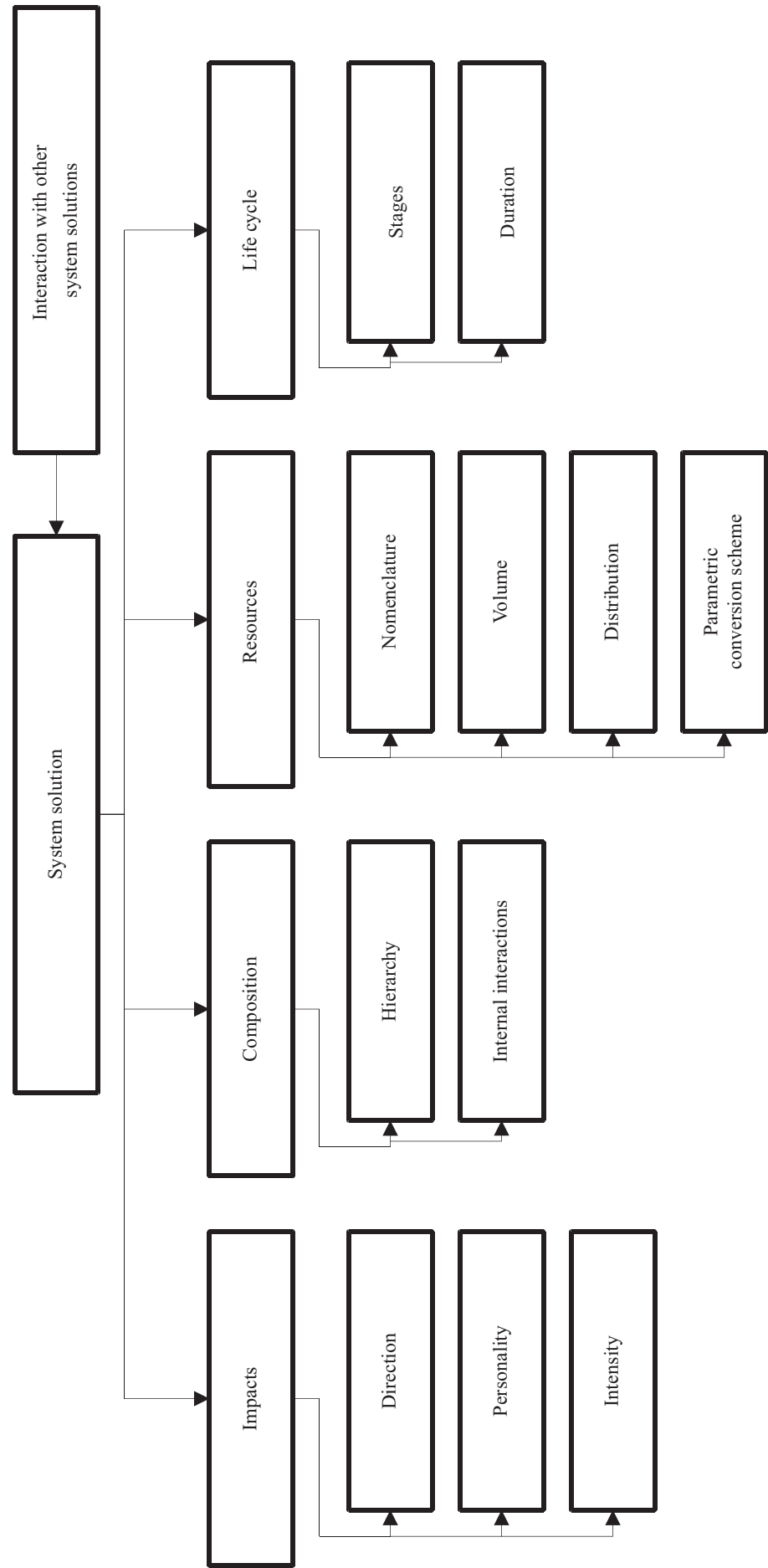


Fig. 3. Main functional elements and characteristics of a system solution

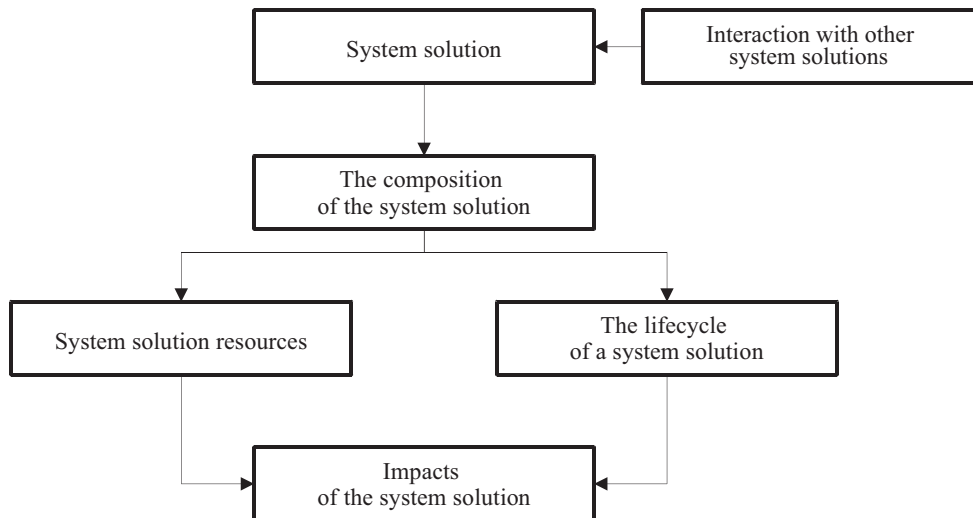


Fig. 4. Diagram showing the composition of elements within the overall structure of a system solution

each specific case by relationships of subordination, which form a hierarchy, and relationships of coupling, which ensure internal interactions and determine their specific features.

Any achievement of an objective, any solution to a problem, requires resources (material, technical, labour), which are expressed in terms of nomenclature (in the case of labour resources — professional and qualification composition), volume (in the case of labour resources — quantity) and their distribution over time and across constituent elements.

In the process of implementing a solution and achieving the intended result, resources are consumed or transformed according to a specific scheme, which is determined by the method (technology) of intervention and is described by a set of parameters. The parametric scheme for the transformation of resources can be presented in various formats, such as a set of drawings, design and project documentation, a business plan, etc.

A system solution has its own life cycle, which largely determines the life cycle of the engineering component. The other solutions that form part of the system solution also have their own temporal characteristics, which can reinforce or weaken the life cycle parameters of the engineering solution and consequently influence the life cycle of the system solution. As each component has its own duration, they differ, amongst other things, in the phased nature of their implementation; for example, they may be implemented in parallel, sequentially, or with a certain time lag.

The adoption and implementation of a solution are always determined by the influence of the controlling entity on the object; that is, a direction is set, and the process is characterized by a certain nature and intensity associated with the control methods used and the specific nature of the organization of this anthropotechnical system.

The functional elements listed above exert a certain influence on one another, as reflected in the sequence

in which they are identified within the system solution (Fig. 4); the same pattern of combination is also observed during its transformation — re-engineering.

As established above, a system solution has both a typological and a functional decomposition, which differ in qualitative and quantitative terms in each specific case. Such differences determine variations in resource allocation, as well as the nature of the life cycle of a particular system solution and, consequently, require a separate approach to the formulation and implementation of actions affecting the control object.

On the basis of the above, the actual implementation of the fundamental principles of systems engineering in the theoretical and practical foundations of re-engineering can be considered established. The category of “system solution” proposed by the authors, and its interpretation, allow for wide application across various fields of scientific knowledge and contribute to broadening the scope and horizons of research through the mutual enrichment of the methodological apparatus of the subject areas under consideration. The use of this category in the methodology of re-engineering reinforces the epistemological aspects of the systems approach to management; specifically, it establishes the convergent foundations for the development of economic systems through the mutually beneficial convergence and reciprocal interpenetration of their basic subsystems and elements.

The decision underpinning the system may fall into one of the characteristic cases defined by its relationship to social production (Fig. 5):

- 1) the material sphere;
- 2) the non-material sphere;
- 3) the material and non-material spheres.

By considering re-engineering in the context of such a development of systems engineering principles in management, it is possible to identify its comprehensive and in-depth application within the system of social production. By developing both the productive forces (objects, means and technologies of production) and the relations

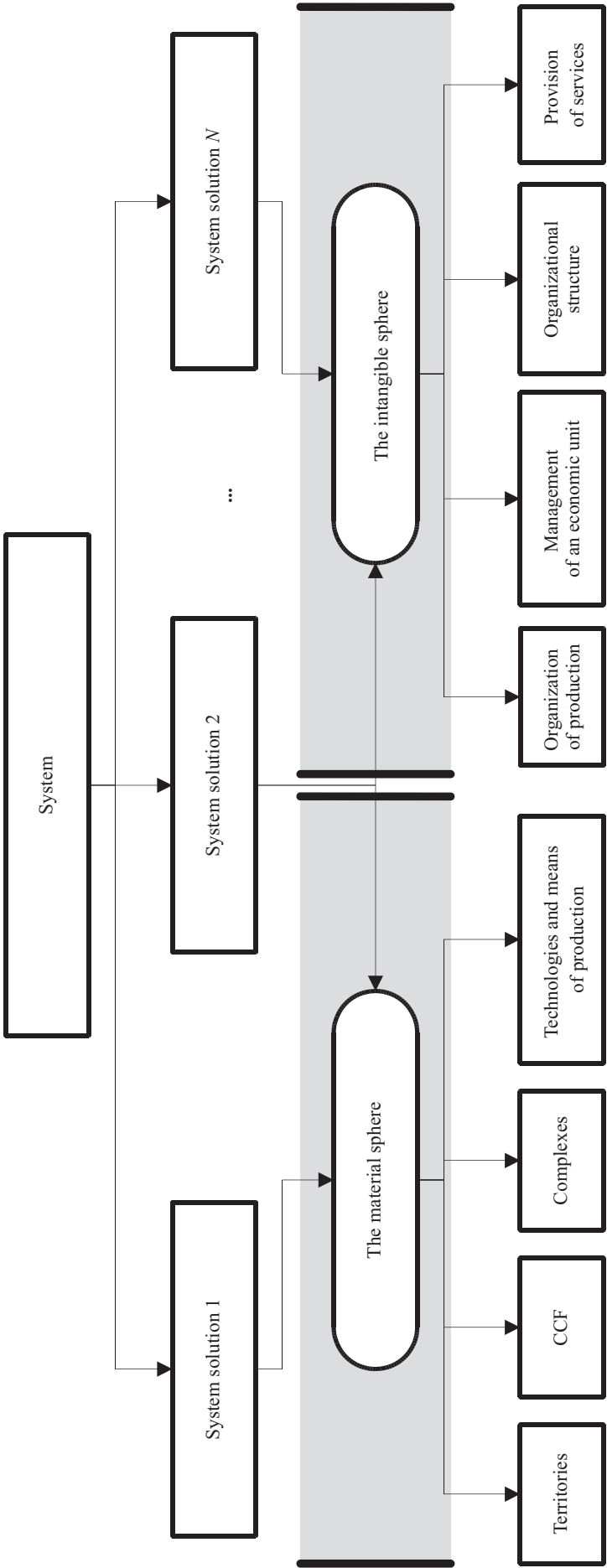


Fig. 5. Coverage of the spheres of social production by a systemic solution

of production associated with organizational forms (specialization and cooperation), re-engineering at the macro-economic level ensures expanded reproduction, the main factor of which is scientific and technological progress.

CONCLUSION AND DISCUSSION

On the basis of the above, it can be concluded that the methodological principles for identifying a systemic solution and applying it to re-engineering in the construction industry contribute to: 1) the effective management

of the life cycle of both tangible and intangible assets through their qualitative transformation; 2) an improvement in the quality of construction output, and a reduction in the cost and duration of construction. Thus, systems engineering principles of management when implementing re-engineering in the construction industry will enable a business entity to achieve sustainable development, flexibility in interacting with the surrounding economic environment, and production efficiency; and, on this basis, to build competitive advantages and realize additional benefits.

REFERENCES

1. Sborshikov S.B. *Logistics of regulatory influences in the investment and construction sector (theory, methodology, practice) : dissertation ... doctor of economics*. Moscow, 2012; 361. EDN QGBVJV. (rus.).
2. Sborshikov S.B., Lazareva N.V., Zhuravlev P.A. A set of measures to improve the management systems of investment and construction activities based on reengineering. *Innovation and Investment*. 2026; 2:59-62. EDN DODQIU. (rus.).
3. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Theoretical and methodological provisions of the concepts of change management and reengineering, prospects for their integration: difference and convergence. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2026; 19(1):59-69. DOI: 10.17073/2072-1633-2026-1-1518. EDN ZBQMVG. (rus.).
4. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Theoretical foundations and practices of reengineering realization in construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(11):1824-1834. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1824-1834. EDN EUMLUQ. (rus.).
5. Zhuravlev P.A. System solutions in the reengineering of territories and buildings. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2025; 18(4):499-504. DOI: 10.17073/2072-1633-2025-4-1522. EDN OSPAYN. (rus.).
6. Zhuravlev P.A. *The system of normative and methodological support for making organizational and technological decisions during the reconstruction and renovation of buildings and structures : dissertation ... candidate of technical sciences*. 2015; 224. EDN UHTWWH. (rus.).
7. Mitenkov A.V., Eliseeva E.N. Evolution of innovation ecosystems and business transformation. Bulletin of the South Russian State Technical University (NPI). *Series: Socio-economic Sciences*. 2024; 17(2):154-165. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-2-154-165. EDN EXRBOL. (rus.).
8. Mitenkov A.V. The birth of the metaverse and the prerequisites for the transformation of management in organization: the eco-aspect. *Management in Russia and abroad*. 2024; 4:56-62. EDN XELKPN. (rus.).
9. Mitenkov A.V. On the issue of transformation management methodology: the Shingo model. Bulletin of the Udmurt University. *Economics and Law series*. 2024; 34(4):652-659. DOI: 10.35634/2412-9593-2024-34-4-652-659. EDN XUTVLE. (rus.).
10. Malakhov V.I. Modern management technologies in construction. *Economy*. 2018; 1:10-11. (rus.).
11. Malakhov V.I. ISI-30. Classification of construction projects. *SamoVod*. 2021. (rus.).
12. Chelyshkov P.D., Volkov A.A., Davydov A.E. Digital management system of the life cycle of capital construction objects. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 2:10-19. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.02.10-19. EDN NFJCNH. (rus.).
13. Volkov A.A., Kagan P.B., Afanasyeva A.A. Construction in the context of the development of the digital economy. System engineering of construction. *Cyberphysical Building Systems – 2019 : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 63-67. EDN FJGPCH. (rus.).
14. Leibman D.M. Organization of the construction of technically complex facilities. *Rationing and Remuneration in Construction*. 2018; 5:64-73. EDN YGZNBG. (rus.).
15. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015. EDN ZWVUYJ.
16. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Engineering as a basis for modernization of the construction industry. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of the VI International Scientific Conference*. 2018; 162-166. EDN YQGTVB. (rus.).
17. Shinkareva G.N. *Model of the engineering scheme of construction organization for life cycle contracts : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2018. EDN XJZLZQ. (rus.).
18. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Integrated engineering as a way to intensify construction production. *Rationing and Remuneration in Construction*. 2018; 3:37-41. EDN QIPUEW. (rus.).

19. Zharov Ya.V. Organizational technological design in construction based on an intelligent planning unit. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):193-199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ. (rus.).

20. Zharov Ya.V. Building information modeling based on block-cluster structure. *Rationing and Remuneration in Construction*. 2019; 11:10-14. EDN XTWNSE. (rus.).

21. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101. EDN MFGKEQ.

22. Popkov A.G. Implementation of integrated logistics solutions of the corporation “single customer”: on the example of the construction industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022; 12(5-1):324-328.

DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR. (rus.).

23. Popkov A.G. Promote women in the combination of career and reproductive labor. *Economics and Entrepreneurship*. 2019; 2(103):779-781. EDN BZAZYK. (rus.).

24. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of construction of a high-rise building life cycle. *Construction — formation of the living environment : collection of materials from the seminar of young scientists of the XXV International Scientific Conference*. 2022; 115-120. EDN XSOQZK. (rus.).

25. Sborshikov S., Vvedenskiy R., Markova I. Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities. *E3S Web of Conferences*. 2021; 02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126-30-2047. EDN HBQVVX.

Received April 17, 2026.

Adopted in revised form on April 27, 2026.

Approved for publication on May 3, 2026.

B I O N O T E S : **Sergey B. Sborschikov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Management; **National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS)**; build. 1, 14 Leninsky prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation; Chief Researcher, Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; tous2004@mail.ru;

Natalia V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Management; **National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS)**; build. 1, 14 Leninsky prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergey B. Sborschikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natalia V. Lazareva — processing of the material, conducting the study, revision of the text description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07:624.04

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.7

Исследование прочности и деформативности быстросборного контактного узла примыкания балки к колонне

Иван Владимирович Мыльников, Валентина Матвеевна Туснина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается быстросборный контактный узел примыкания балки к колонне по системе «ласточкин хвост». При монтаже балка устанавливается опорными ребрами в гнезда, изготовленные и приваренные к колонне в заводских условиях. Фиксация ригеля от продольного перемещения обеспечивается заполнением монтажных зазоров доборными пластинами. Данное решение позволяет просто и надежно соединять ригель двутаврового сечения с колонной из квадратного гнутосварного профиля.

Материалы и методы. При определении предельного изгибающего момента M_{lim} и коэффициента защемления балки в узле С использовался кинематический метод предельного равновесия. Полагая, что пластические деформации могут значительно превзойти упругие, принималась диаграмма работы стали как для жесткопластического тела. Также предполагалось, что линии излома гнездовых пластин являются линейными пластическими шарнирами, вдоль которых действуют только моментные векторы; пластины принимались жестко защемленными по двум смежным краям и свободными от закреплений по двум другим смежным краям.

Результаты. Построена фактическая эпюра моментов для упруго защемленной по концам балки, нагруженной двумя сосредоточенными силами, симметрично расположенными от опор; получена формула для определения угла поворота на опорах φ .

Выводы. В ходе сравнительного анализа выявлено, что при использовании в опорном гнезде пластин толщиной 5 мм узел работает практически как шарнирный; при использовании пластин толщиной 10 мм — как полужесткий. Предложенный контактный узел примыкания балки к колонне может рекомендоваться к применению в проектировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальной каркас, контактные соединения, податливый узел, метод предельного равновесия, жесткость, опорный момент, угол поворота

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мыльников И.В., Туснина В.М. Исследование прочности и деформативности быстросборного контактного узла примыкания балки к колонне // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 7. URL: <http://inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.7

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Мыльников, miv_2499@mail.ru.

Investigation of the strength and deformability of a quick- assembly contact beam-to-column joint

Ivan V. Mylnikov, Valentina M. Tushina

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

ABSTRACT

Introduction. A quick-assembly contact beam-to-column joint based on the dovetail system is considered in the article. During installation, the beam is seated by its support ribs in sockets manufactured and welded to the column under factory conditions. Longitudinal displacement of the girder is prevented by filling the erection gaps with shim plates. This solution provides a simple and reliable connection between an I-section girder and a column made of a square cold-formed welded hollow section.

Materials and methods. The kinematic method of limit equilibrium was used to determine the limiting bending moment M_{lim} and the beam fixity coefficient C in the joint. Assuming that plastic deformations can significantly exceed elastic deformations, the steel stress-strain diagram was idealized as that of a rigid-plastic body. It was also assumed that the yield lines of the socket plates are linear plastic hinges along which only moment vectors act; the plates were considered rigidly fixed along two adjacent edges and free along the other two adjacent edges.

Results. The actual bending-moment diagram was constructed for a beam elastically restrained at both ends and loaded by two concentrated forces arranged symmetrically with respect to the supports; a formula was obtained for determining the support rotation angle φ .

Conclusions. The comparative analysis showed that when 5 mm thick plates are used in the support socket, the joint behaves almost as a hinge; when 10 mm thick plates are used, it behaves as a semi-rigid joint. The proposed contact beam-to-column joint can be recommended for use in design practice.

KEYWORDS: steel frame, contact joints, compliant joint, limit equilibrium method, stiffness, support moment, rotation angle

FOR CITATION: Mylnikov I.V., Tushina V.M. Investigation of the strength and deformability of a quick-assembly contact beam-to-column joint. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.7

Corresponding author: Ivan V. Mylnikov, miv_2499@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стальной каркас многоэтажного здания, выполненный по связевой конструктивной схеме, хорошо отвечает принципу концентрации материала и отличается от рамного и рамно-связевого каркасов простотой сопряжения ригелей с колоннами и меньшей трудоемкостью возведения. Узлы «балка – колонна» в расчетах таких каркасов теоретически принимаются шарнирными, однако на практике, как показывают исследования их действительной работы, они обладают определенной жесткостью, зависящей от их конструктивного решения.

В НИУ МГСУ разработан быстросборный контактный узел примыкания балки к колонне без применения сварочных и болтовых работ на строительной площадке. Устройство такого узла заключается в установке балки в специальные детали — гнезда, приваренные к колонне в заводских условиях. В таком сопряжении балки с колонной передача усилий происходит за счет контактного взаимодействия опорных деталей узла, работающих по системе «ласточкин хвост».

Современные возможности металлообработки позволяют легко изготовить конструктивные элементы каркаса с такими закладными деталями, что будет способствовать быстрому и простому монтажу

стального каркаса, существенно сократив сроки возведения здания [1–3].

Настоящее исследование посвящено изучению действительной работы быстросборного контактного узла примыкания балки к колонне, устроенного по типу «ласточкин хвост», в стальном каркасе многоэтажного здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи

Рассмотрим быстросборный узел примыкания балки к колонне по системе «ласточкин хвост». Сечение балки — прокатный двутавр 20Б1, опорное ребро $150 \times 100 \times 10$ мм; сечение колонны — квадратный гнутосварной профиль 200×8 мм, опорное гнездо $190 \times 160 \times 20$ мм, размеры посадочного паза $140 \times 105 \times 15$ мм (рис. 1–3). Балка опорными ребрами устанавливается в гнезда, приваренные к двум колоннам. Материал — сталь С345К.

В рассмотренном соединении присутствуют два зазора: Δ_1 — между стенкой колонны и опорным ребром и Δ_2 — между опорным ребром и пластинами опорного гнезда (рис. 4). Зазор Δ_1 плотно заполняется по месту доборными пластинами для предотвращения продольного смещения балки. Величина оставшегося зазора Δ_2 мала [4–7].

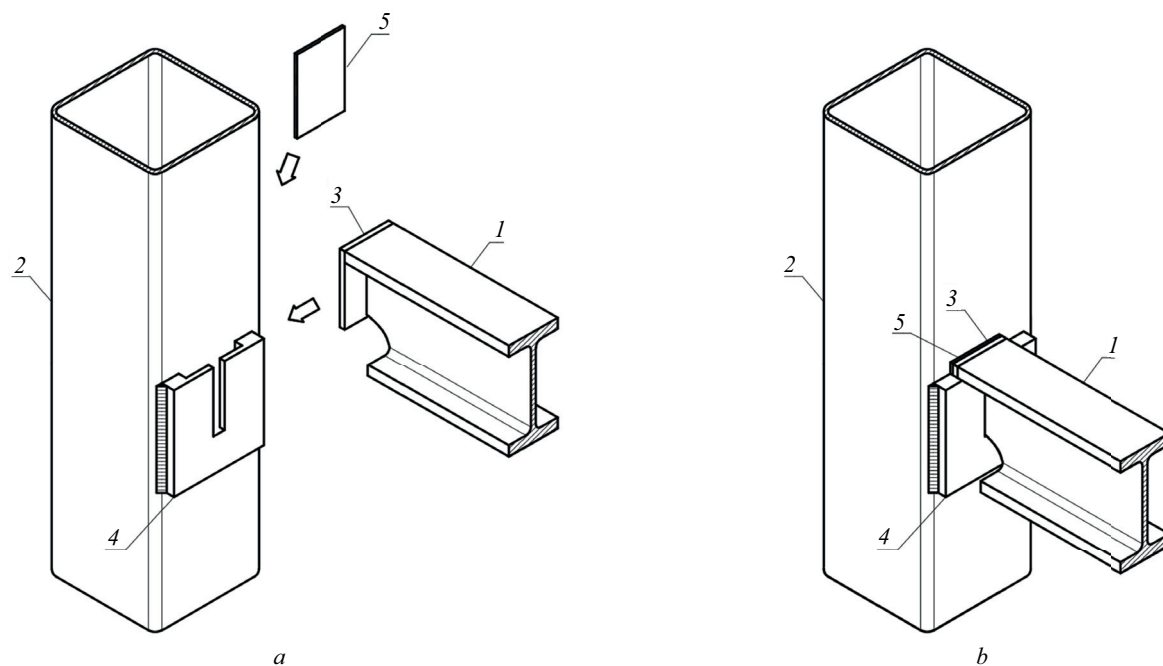


Рис. 1. Схема сборки узла примыкания балки к колонне по системе «ласточкин хвост»: а — в разобранном виде; б — в собранном виде; 1 — балка; 2 — колонна; 3 — опорное ребро; 4 — опорное гнездо; 5 — доборная пластина

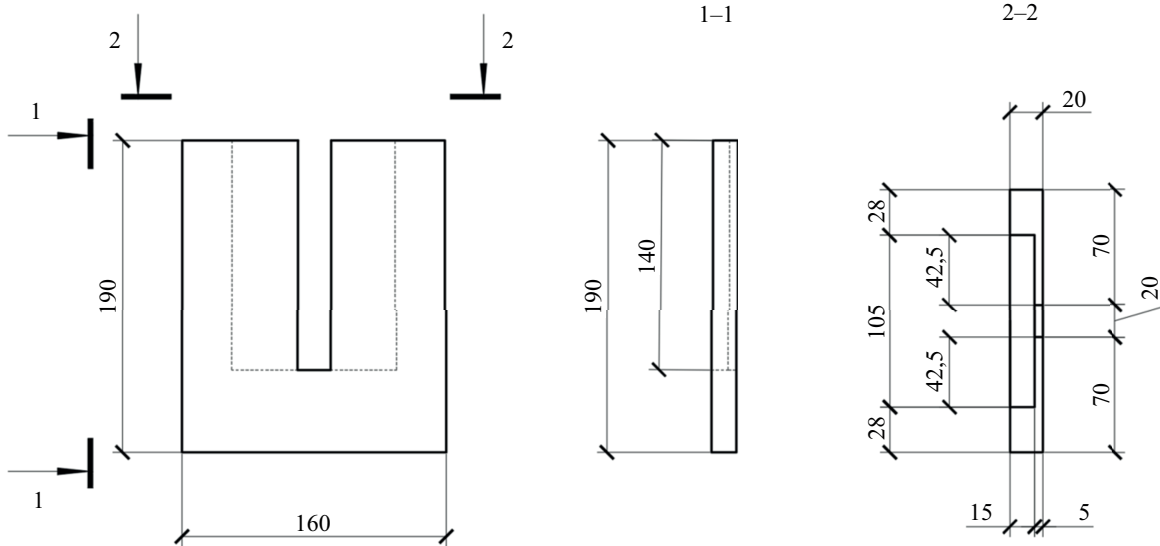


Рис. 2. Размеры опорного гнезда, привариваемого к колонне

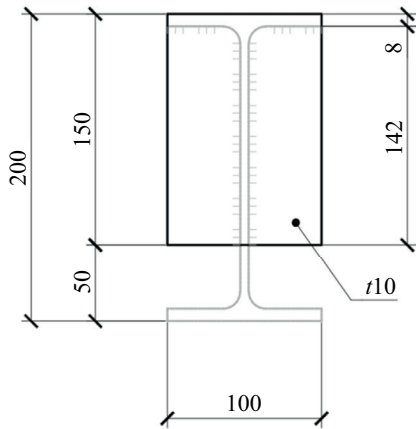


Рис. 3. Размеры опорного ребра, привариваемого к балке

Предполагаем, что зазор Δ_1 заполнен полностью, а зазор Δ_2 равен нулю (случай абсолютно плотной посадки). Таким образом, при действии на балку поперечной нагрузки на опорах будет возникать изгибающий момент некоторой величины M , которая будет зависеть от податливости соединения C .

При действии поперечной нагрузки на балку возникает изгибающий момент M , деформируются опорное ребро балки и пластины опорного гнезда, которые препятствуют его повороту. Происходят горизонтальное перемещение Δ и угол поворота φ в плоскости стенки балки вокруг точки O , что провоцирует возникновение значительных касательных напряжений в зоне заделки ограничивающего листа к опорному гнезду [8–10].

Необходимо определить для данного соединения:

- 1) предельный изгибающий момент M_{lim} ;
- 2) угол поворота опорного сечения балки φ ;
- 3) коэффициент защемления балки C и фактическое распределение изгибающего момента M в балке.

Для решения будем использовать кинематический метод теории предельного равновесия, который формулируется следующим образом: для заданной статически неопределимой системы при действии заданного вида нагрузки величина предельной нагрузки $P_{пр}$, соответствующая распределению изгибающих моментов для какого-либо возможного механизма разрушения, всегда больше действительной разрушающей нагрузки или равна ей (или иначе: из всех форм разрушения истинна та, которой соответствует наименьшая предельная нагрузка $P_{пр}$) [11].

Согласно этому методу надо из всех возможных механизмов разрушения с одной степенью свободы записать уравнение равновесия в форме работ (принцип Лагранжа) на тех перемещениях, которые возможны для данного механизма. При этом возможная работа внешних сил считается положительной и равна произведению силы $P_{i,пр}$ на соответствующее линейное перемещение Δ_i , а возможная работа внутренних сил, т.е. предельных изгибающих моментов $M_{j,пр}$, возникающих в пластических шарнирах, — отрицательной и равной произведению $M_{j,пр}$ на угол поворота θ_j , характеризующий возможную деформацию в j -м шарнире:

$$\sum_i P_{i,пр} \Delta_i = \sum_j M_{j,пр} \theta_j.$$

При решении будем использовать диаграмму жесткопластического тела (рис. 5), согласно которой полагается, что до развития пластического течения материал остается абсолютно недеформируемым. Такая модель достаточно характеризует действительную работу конструкции при отсутствии факторов, сдерживающих развитие деформаций в пластической области. Так как пластические деформации могут значительно превзойти упругие, то оправданно использование схемы жесткопластического тела.

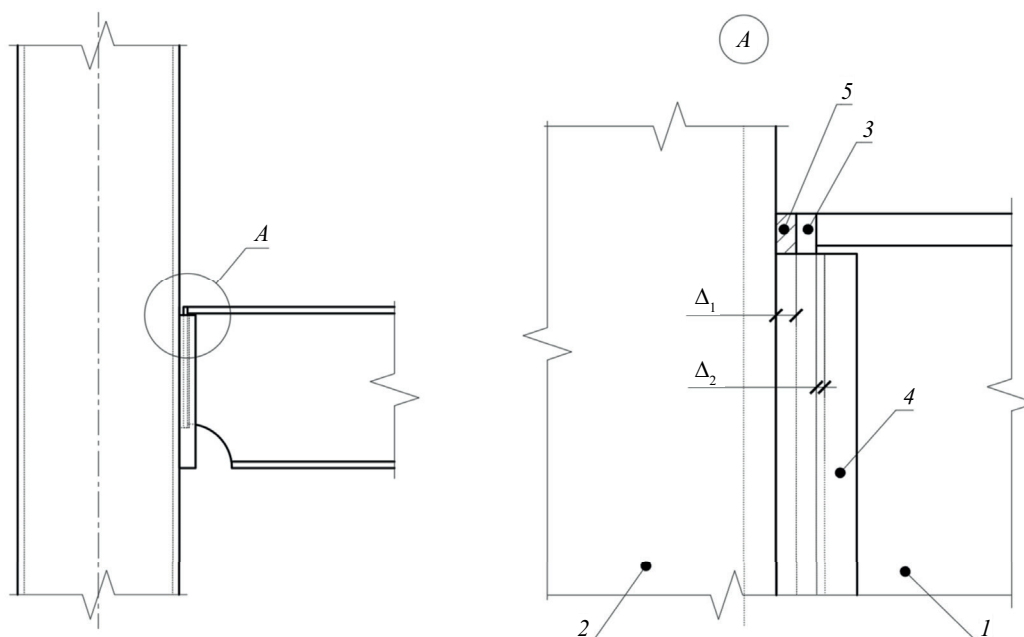


Рис. 4. Зазоры в узле: 1 — балка; 2 — колонна; 3 — опорное ребро; 4 — опорное гнездо; 5 — доборная пластина

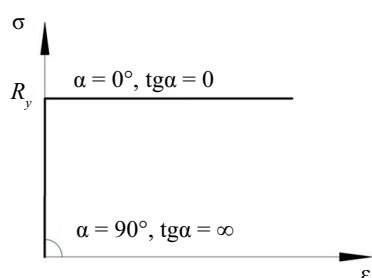


Рис. 5. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ для жесткопластического тела

Схема кинематического механизма узла показана на рис. 6.

В расчете опорное гнездо представляем в виде двух пластин, прикрепленных к жесткому телу и подвергнутых изгибу из плоскости. Рассматриваемый

кинематический механизм узла предполагает следующие допущения:

1. Линии излома являются линейными пластическими шарнирами, вдоль которых действуют только моментные векторы.
2. Пластина считается жестко защемленной по двум смежным краям и свободной от закреплений по двум другим смежным краям.

Определение предельного изгибающего момента M_{lim}

Рассмотрим кинематически возможное состояние опорного гнезда при изгибе балки. На рис. 7 отрезок AB соответствует линейному пластическому шарниру, длина которого равна:

$$AB = l = \sqrt{b^2 + h^2}.$$

Угол поворота φ в плоскости стенки балки равен:

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta}{h}.$$

Пренебрегая вертикальным смещением, при поперечном изгибе пластины точка C перемещается горизонтально в точку C' . Двугранный угол $CABC'$ равен:

$$\angle CABC' = \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta}{x} = \frac{\Delta \sqrt{b^2 + h^2}}{bh}.$$

Для двух пластин работа внутренних сил будет определяться выражением:

$$U = 2 \int_0^l M_{пл} \theta dL \approx 2 M_{пл} \sum \theta_i l_i,$$

где $M_{пл} = R_y W_{пл} = \sigma_y t^2/4$ — единичный предельный изгибающий момент, при котором наступает текучесть; R_y — расчетное сопротивление стали по пределу те-

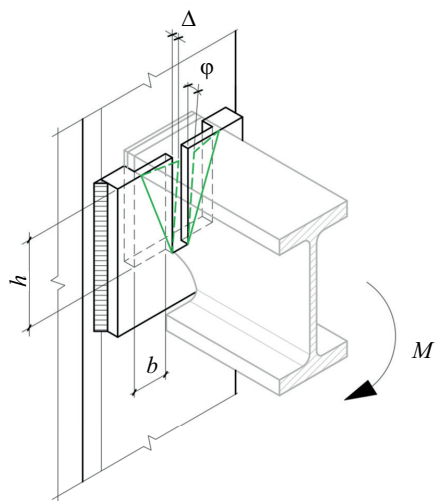


Рис. 6. Схема кинематического механизма узла

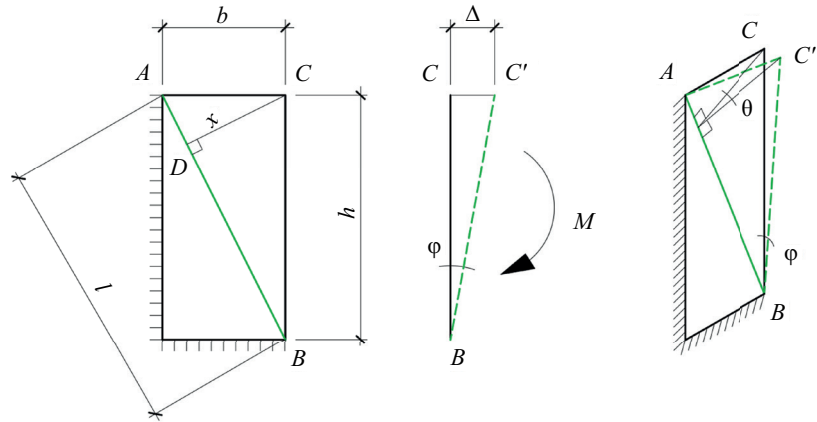


Рис. 7. Схема пластического шарнира в узле для одной из двух пластин опорного гнезда

кучести; t — толщина пластины; l — длина линейного пластического шарнира; θ_i и l_i — элементарный угол перелома и соответствующая ему элементарная длина линейного шарнира.

Тогда выражение для работы внутренних сил пластины принимает вид:

$$\begin{aligned} U &= 2 \frac{R_y t^2}{4} \cdot \frac{\Delta \sqrt{b^2 + h^2}}{bh} \cdot \sqrt{b^2 + h^2} = \\ &= 2 \frac{R_y t^2}{4} \cdot \frac{\Delta}{bh} \cdot (b^2 + h^2) = \\ &= \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{b} \cdot \frac{b^2 + h^2}{h}. \end{aligned}$$

Выражение работы внешних сил равно:

$$A = M\phi = M \frac{\Delta}{h}.$$

Приравняв выражения работ внешних и внутренних сил, получим:

$$M \frac{\Delta}{h} = \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{b} \cdot \frac{b^2 + h^2}{h},$$

откуда можно определить предельный изгибающий момент, воспринимаемый опорным узлом:

$$M_{lim} = \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{b^2 + h^2}{b}.$$

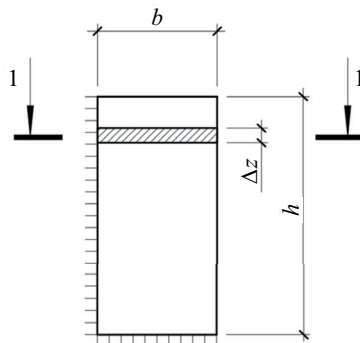


Рис. 8. Расчетная схема пластины

Определение коэффициента защемления балки C

Для определения жесткости узла C рассмотрим элементарную горизонтальную консольную полоску пластины шириной Δz (рис. 8).

Горизонтальная реакция от перемещения свободного края будет равна:

$$R = \frac{3EJ}{b^3} \cdot y = \frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot y,$$

где E — модуль упругости стали; $J = \Delta z \cdot t^3/12$ — момент инерции элементарной полоски; b и t — ширина и толщина пластины

Угол поворота пластины в заделке является переменной величиной и определяется следующим образом (рис. 9):

$$\gamma \approx \operatorname{tg} \gamma \approx y/z,$$

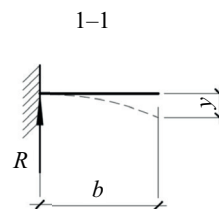
откуда

$$y = \gamma \cdot z.$$

Тогда:

$$R = \frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot \gamma \cdot z.$$

Предположив для простоты, что полоски шириной Δz не связаны между собой, можно записать выражение для удельного изгибающего момента $\bar{M}$,



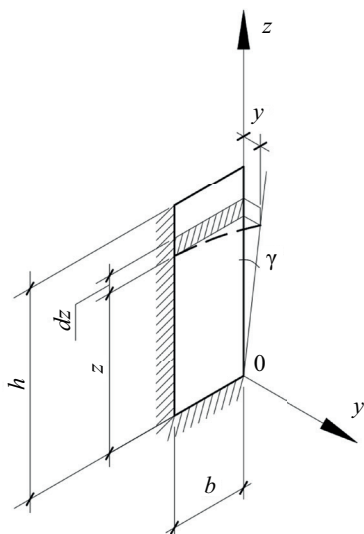


Рис. 9. Схема деформации пластины

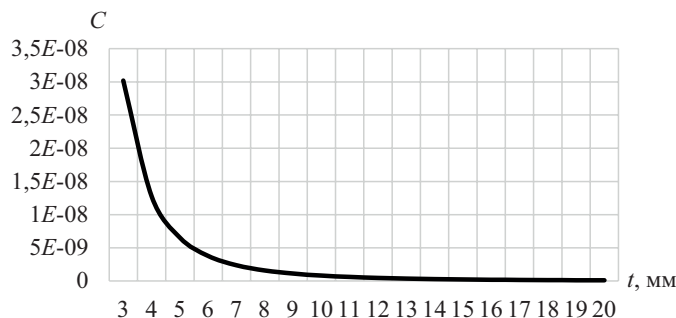
соответствующего повороту опорного сечения балки на единичный угол в узле:

$$\begin{aligned}\bar{M} &= \frac{M}{\gamma} = 2 \int_0^h \frac{R z dz}{\gamma \Delta z} = \\ &= 2 \int_0^h \left(\frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot \gamma \cdot z \right) \frac{z dz}{\gamma \Delta z} = \\ &= \frac{2E \cdot t^3}{4b^3} \int_0^h z^2 dz = \frac{E}{2} \left(\frac{t}{b} \right)^3 \cdot \frac{h^3}{3} = \frac{E}{6} \left(\frac{t \cdot h}{b} \right)^3.\end{aligned}$$

Коэффициент защемления балки — это величина, обратная удельному изгибающему моменту, соответствующему повороту опорного сечения балки на единичный угол. Следовательно, выражение для коэффициента защемления балки выглядит так:

$$C = \frac{1}{\bar{M}} = \frac{6}{E} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3.$$

На рис. 10 показана зависимость коэффициента защемления балки C от толщины пластин t (параметры b и h приняты постоянными). Графиком является кубическая гипербола.

Рис. 10. График зависимости коэффициента защемления балки C от толщины пластин t

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение опорных моментов в ригелях и углов поворота их опорных сечений

Для определения опорных моментов в балке и углов поворота ее опорных сечений в качестве расчетной схемы примем балку ступенчатой жесткости, упруго защемленную на опорах и нагруженную двумя сосредоточенными силами $P/2$ на расстоянии d от края балки (рис. 11). При этом будем полагать, что влияние жесткости колонн несущественно.

Длина m , обозначенная на рис. 11, равна толщине ограничивающего «лепестка» опорного гнезда, т.е. $m = t$.

Степень статической неопределимости заданной системы равна 1. Определим опорный момент в ригеле при помощи метода сил. Основная система представляет собой классическую шарнирно опертую балку (рис. 12, а), где в качестве симметричного неизвестного X_1 принят изгибающий момент на опорах. Каноническое уравнение метода сил запишется в виде:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} + \varphi = 0.$$

Левая часть уравнения описывает суммарный угол поворота опоры, где φ — часть этого угла, зависящая от коэффициента защемления c , определенного выше: $\varphi = c \cdot X_1$.

Тогда каноническое уравнение метода сил примет вид:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} + C \cdot X_1 = 0.$$

Единичная эпюра $\bar{M}_1$ и грузовая эпюра M_P представлены на рис. 12, б и 12, с.

Коэффициенты δ_{11} и Δ_{1P} определяются по формуле Максвелла – Мора с использованием правила Верещагина:

$$\delta_{11} = \sum \int \frac{\bar{M}_1^2 dx}{EJ} = 2 \frac{m \cdot 1 \cdot 1}{EJ'} + \frac{(l - 2m) \cdot 1 \cdot 1}{EJ};$$

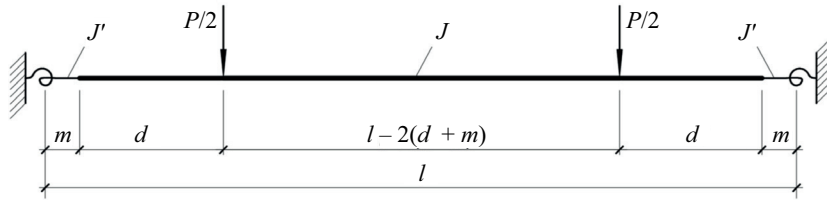


Рис. 11. Расчетная схема балки ступенчатой жесткости, упруго защемленной на опорах

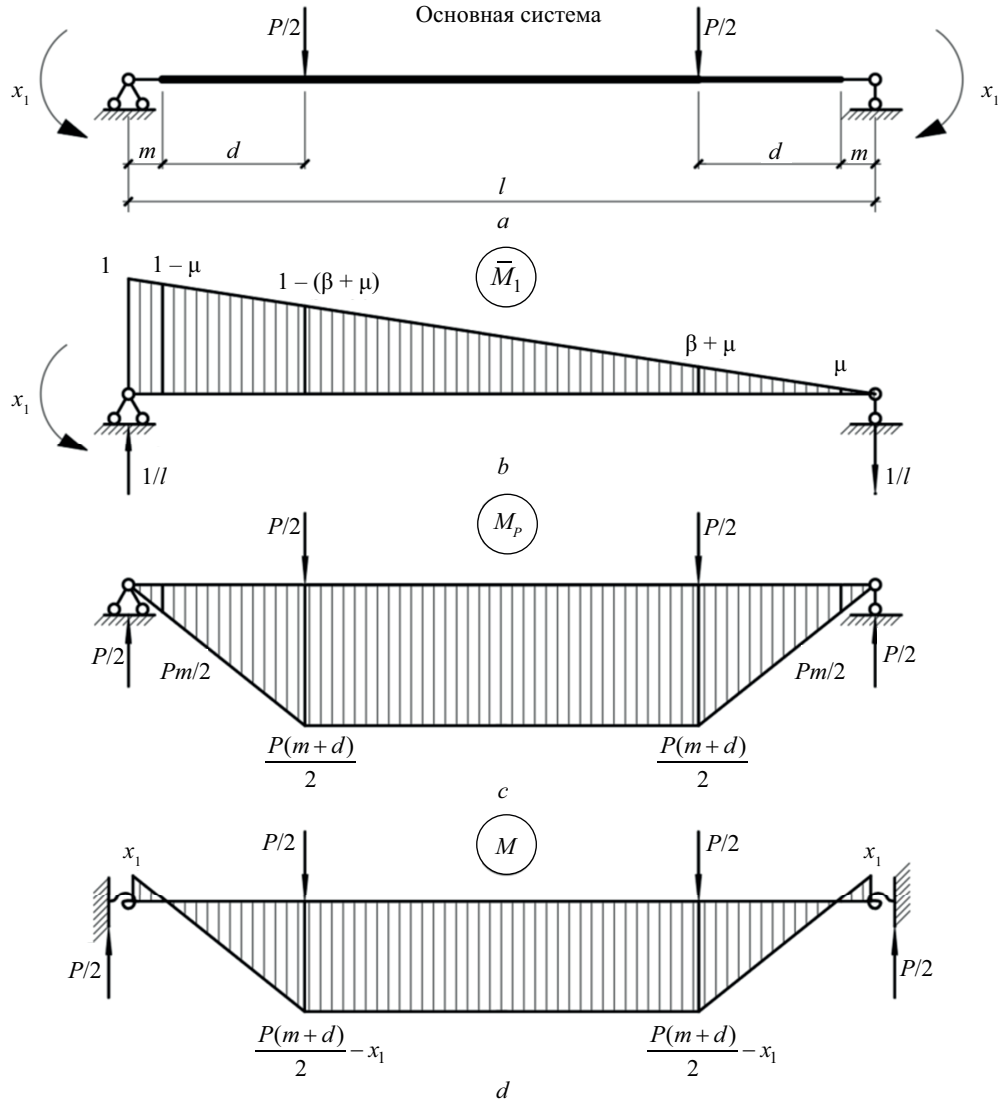


Рис. 12. К расчету балки методом сил: а — основная система; б — единичная эпюра $\bar{M}_1$; с — грузовая эпюра M_p ; д — окончательная эпюра моментов M

$$\Delta_{1P} = \sum \int \frac{M_p \bar{M}_1}{EJ} dx = -\frac{P(m+d)}{4EJ} (l - 2(m+d)) \cdot 1 -$$

$$- \left[\frac{P(m+d)}{2} + \frac{Pm}{2} \right] \cdot d \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{Pm}{2} \cdot \frac{m}{EJ'}.$$

Если принять, что:

$$J' = \alpha \cdot J; \quad m = \mu \cdot l; \quad d = \beta \cdot l,$$

то выражения для δ_{11} и Δ_{1P} можно переписать:

$$\delta_{11} = \frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right];$$

$$\Delta_{1P} = -\frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right].$$

Определим неизвестное X_1 :

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11} + C'};$$

$$X_1 = \frac{\frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right]}{\frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right] + \frac{6}{E} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3}.$$

Упростив полученное выражение и пренебрегая компонентом μ ввиду его малой величины по сравнению с единицей, можно записать:

$$X_1 = \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + 24 \cdot \frac{J}{l} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3}.$$

Учитывая, что $2 \frac{th^3}{12} = \alpha \cdot J$, J можно записать окончательно формулу для определения опорного момента в балке с узлами по системе «ласточкин хвост»:

$$M_{оп} = \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + \frac{4b}{\alpha \cdot l} \left(\frac{b}{t} \right)^2}.$$

Наибольший изгибающий момент в пролете для двухточечной схемы изгиба равен:

$$M_{пр} = \frac{P(t+d)}{2} - \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + \frac{4b}{\alpha \cdot l} \left(\frac{b}{t} \right)^2}.$$

Окончательная эпюра изгибающих моментов показана на рис. 12, d.

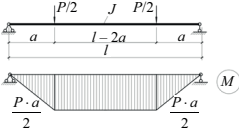
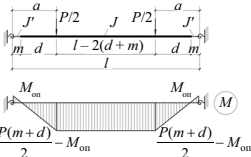
Угол поворота балки на опоре, зависящий от упругих свойств конструкции узла, можно определить следующим образом:

$$\varphi = C \cdot X_1; \quad X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11} + C};$$

$$\begin{aligned} \varphi &= -\frac{\Delta_{1P}}{\frac{\delta_{11}}{C} + 1} = \\ &= \frac{\frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right]}{\frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right] + 1 + \frac{6}{E} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3} = \\ &= \frac{Pl^2}{4EJ} \cdot \frac{\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta)}{1 + \frac{\alpha t^2 l}{3b^3} \cdot \left(1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right)}. \end{aligned}$$

Используя полученные выражения, можно сравнить работу балки, упруго защемленную по концам, с классическими вариантами: с шарнирно опертой балкой и с балкой, жестко защемленной по концам [12–15]. В таблице приводятся значения изгибающих моментов и углов поворотов опорных сечений для разных расчетных случаев [16–20]. Рассматриваются пролеты балок 3, 4,5 и 6 м; две сосредоточенные силы прикладываются на расстоянии $a = l/4$ от опор. Для упруго защемленной балки определены значения моментов и углов поворота при $b = 42,5$ мм, $h = 140$ мм, $t = 5$; 10 мм. Сечение балки — прокатный

Значения изгибающих моментов и углов поворота опорных сечений для разных вариантов расчетных схем

Номер	Расчетная схема и эпюра моментов	Пролет l, м	Отступ a, м	Опорный момент M _{оп} , кН·м	Пролетный момент M _{пр} , кН·м	Угол поворота на опоре φ _{оп} , рад.	Примечание
1		3,0	0,75	0	75	0,0222 (φ ^ш _{оп})	—
2		4,5	1,125	0	112,5	0,05 (φ ^ш _{оп})	—
3		6,0	1,5	0	150	0,0888 (φ ^ш _{оп})	—
4		3,0	0,75	3,27	71,73	0,0213	M ^c _{оп} = 8,73 % M ^c _{оп} φ ^c _{оп} = 96,12 % φ ^ш _{оп}
5		4,5	1,125	7,23	105,27	0,0471	M ^c _{оп} = 12,85 % M ^c _{оп} φ ^c _{оп} = 94,29 % φ ^ш _{оп}
6		6,0	1,5	12,61	137,39	0,0822	M ^c _{оп} = 16,81 % M ^c _{оп} φ ^c _{оп} = 92,53 % φ ^ш _{оп}

Окончание табл.

Номер	Расчетная схема и эпюра моментов	Пролет l , м	Отступ a , м	Опорный момент $M_{оп}$, кН·м	Пролетный момент $M_{пр}$, кН·м	Угол поворота на опоре $\varphi_{оп}$, рад.	Примечание
7		3,0	0,75	20,60	54,40	0,0168	$M_{оп}^e = 54,94 \% M_{оп}^s$ $\varphi_{оп}^e = 75,58 \% \varphi_{оп}^s$
8		4,5	1,125	41,31	71,19	0,0337	$M_{оп}^e = 73,44 \% M_{оп}^s$ $\varphi_{оп}^e = 67,36 \% \varphi_{оп}^s$
9		6,0	1,5	66,23	83,77	0,0540	$M_{оп}^e = 88,31 \% M_{оп}^s$ $\varphi_{оп}^e = 60,75 \% \varphi_{оп}^s$
10		3,0	0,75	37,5 ($M_{оп}^s$)	37,5	0	—
11		4,5	1,125	56,25 ($M_{оп}^s$)	56,25	0	—
12		6,0	1,5	75 ($M_{оп}^s$)	75	0	—

Примечание: $M_{оп}^s$ и $M_{оп}^e$ — опорные моменты, возникающие в балке, защемленной жестко или упруго соответственно; $\varphi_{оп}^s$ и $\varphi_{оп}^e$ — углы поворота на опорах, возникающие в балке, шарнирно опертой или упруго защемленной соответственно.

двутавр 20Б1 по ГОСТ Р 57837–2017. Значение силы P принято равным 200 кН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе кинематического метода теории предельного равновесия получены выражения для определения предельного изгибающего момента M_{lim} и коэффициента защемления балки C для конструкции контактного узла примыкания балки к колонне, работающего по системе «ласточкин хвост».

Используя метод сил, построена фактическая эпюра моментов для упруго защемленной по концам балки, нагруженной двумя сосредоточенными силами, симметрично расположенными от опор.

Получена формула для определения угла поворота опорного сечения балки φ для конструкции контактного узла примыкания балки к колонне по типу «ласточкин хвост».

На основании произведенного сравнения с классическими вариантами опирания балки (с шарнирами и жесткими заделками на концах) было определено, что рассматриваемый узел с толщиной гнездовых пластин $t = 5$ мм является практически полностью шарнирным. В этом случае происходит значительный угол поворота на опоре, который для пролета $l = 3$ м составляет 96,12 % от угла поворота на опоре для шарнирной схемы, для пролета $l = 4,5$ м — 94,29 %, а для пролета $l = 6$ м — 92,53 %. Возникающие в схеме с упругими заделками опорные изгибающие моменты для пролета

$l = 3$ м составляют 8,73 % от схемы с жесткими заделками, для пролета $l = 4,5$ м — 12,85 %, а для пролета $l = 6$ м — 16,81 %. Таким образом, для выполнения инженерных расчетов можно считать, что при использовании податливого узла при толщине ограничивающих $t = 5$ мм соотношение между опорным и пролетным моментами составляет 1:10.

Для варианта, когда толщина гнездовых пластин принимается равной $t = 10$ мм, жесткость узла увеличивается. В этом случае возникает угол поворота на опоре, составляющий для пролета $l = 3$ м 75,58 % от угла поворота на опоре для шарнирной схемы, для пролета $l = 4,5$ м — 67,36 %, а для пролета $l = 6$ м — 60,75 %. Действующие в схеме с упругими заделками балки опорные изгибающие моменты для пролета $l = 3$ м составляют 54,94 % от схемы с жесткими заделками, для пролета $l = 4,5$ м — 73,44 %, а для пролета $l = 6$ м — 88,31 %. Следовательно, использование таких ограничивающих листов позволяет считать заделки балки полужесткими и способствует уменьшению пролетных моментов; однако следует заметить, что это повышает металлоемкость узла.

Исследуемый быстросборный узел дает возможность ускорить процесс монтажа элементов стального каркаса на строительной площадке, а определенные выше характеристики позволяют учитывать действительную работу узла при выполнении расчетов. Предложенный контактный узел примыкания балки к колонне может рекомендоваться к применению в инженерной практике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kukla D., Kozłowski A., Ślęczka L., Wójcik-Grząba I., Nykiel D., Gubernat S. Innovative steel beam-to-column joint under central column loss situation: Experimental tests and analytical model // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 326. P. 119513. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119513. EDN DXUCZE.
2. Zhang Z.W., Li D., Wang H.J., Qian H.L., Fang W.Q., Jing X.F. et al. Study of mechanical properties of a novel column-beam-column prefabricated steel frame joint // *Advanced Steel Construction*. 2024. Vol. 20. Issue 4. Pp. 330–344. DOI: 10.18057/ijasc.2024.20.4.2
3. Shi G., Liu M., Luo J., Zhao H. Experimental study on the seismic behavior of steel joints between I-beam and box-T built-up section columns // *Thin-Walled Structures*. 2025. Vol. 216. P. 113626. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113626. EDN SEAQTN.
4. Сунь Г., Миронова Л.И. Влияние изгибной жесткости соединения на работоспособность стального каркаса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2025. Т. 21. № 6. С. 537–550. DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-6-537-550. EDN FOHZXB.
5. Jakovljević I., Dobrić J., Gluhović N., Spremić M. Beam-to-column joint solutions for reusable moment-resisting steel frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2026. Vol. 238. P. 110163. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.110163. EDN AWZYWD.
6. Elhout E.A. Effect of beam-column connection types on the response modification factors of steel frames // *International Journal of Steel Structures*. 2024. Vol. 24. Issue 1. Pp. 132–143. DOI: 10.1007/s13296-023-00805-4. EDN QJSLTJ.
7. Piskulic M., Vujanac R., Vulović S., Miloradovic N., Blagojevic M., Djordjevic Z. Structural Performance of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections in Steel Storage Racks: A Review Focused on FEM Analysis // *Metals*. 2026. Vol. 16. Issue 1. P. 2. DOI: 10.3390/met16010002. EDN ZOHPCX.
8. Туснина В.М. Несущая способность и деформативность податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 166 с.
9. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams // *23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. 2014. Pp. 701–706.
10. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 5 (73). Pp. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.
11. Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и задачах. Ч. II. Статически неопределимые системы : учебное пособие. 4-е изд., доп. и перераб. М. : Издательство АСВ, 2017. 464 с.
12. Глебов Ф.А., Астахов И.В., Корсун В.И., Кондратьева Л.Н., Цыгановкин В. Аналитическая модель метода переменных параметров упругости для расчета фланцевых соединений двутавровой балки с колонной // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 1 (109). С. 462–496. EDN QHDFKI.
13. Nie R., Li Y., Bai Y., Mou B., Zhou Ya. HSS steel corner column to H-beam joints under cyclic bidirectional loadings: Experiment, numerical modeling, and calculation // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 192. P. 107239. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107239. EDN PUAQCH.
14. Lian Ju.Yi., Deng En.F., He J.M., Cai Li.M., Gao Sh.C., Zhou Ji.J. Numerical analysis on seismic performance of corner fitting connection in modular steel building // *Structures*. 2021. Vol. 33. Pp. 1659–1676. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.05.044. EDN ZHINRZ.
15. Celik H., Şakar G. Semi-rigid connections in steel structures: State-of-the-art report on modelling, analysis and design // *Structural Engineering and Mechanics*. 2022. Vol. 45. Issue 1.
16. Yin T., Wang Zh., Zheng K., Lu Sh. A new method for design of the semi-rigid steel frame — the integration of joint inverse design and structural design // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 7. P. 938. DOI: 10.3390/buildings12070938. EDN MRTYXE.
17. Rodríguez González C.A., Caparrós-Manceira Ju.J., Hernández-Torres J.A., Rodríguez-Pérez Á.M. Nonlinear analysis of rotational springs to model semi-rigid frames // *Entropy*. 2022. Vol. 24. Issue 7. P. 953. DOI: 10.3390/e24070953. EDN FFTQGF.
18. Al-Sherif R.H., Ismael M.A. Effect of semi-rigid beam-column connection on structural behavior of steel frames // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2784. P. 020008. DOI: 10.1063/5.0140815
19. Elhout E.A. Effect of beam-column connection types on the response modification factors of steel frames // *International Journal of Steel Structures*. 2024. Vol. 24. Issue 1. Pp. 132–143. DOI: 10.1007/s13296-023-00805-4. EDN QJSLTJ.
20. Piskulic M., Vujanac R., Vulović S., Miloradovic N., Blagojevic M., Djordjevic Z. Structural Performance of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections in Steel Storage Racks: A Review Focused on FEM Analysis // *Metals*. 2026. Vol. 16. Issue 1. P. 2. DOI: 10.3390/met16010002. EDN ZOHPCX.

Поступила в редакцию 20 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 28 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Владимирович Мыльников** — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3437-1337; РИНЦ ID: 1234163, Scopus: 60572662500, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru;

Валентина Матвеевна Туснина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7716-5978, РИНЦ ID: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; tusninavm@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

A steel frame of a multi-storey building designed as a braced structural system conforms well to the principle of material concentration and differs from moment-resisting and braced frames in the simplicity of beam-to-column connections and in lower construction labour input. In the analysis of such frames, beam-to-column joints are theoretically assumed to be pinned; however, as studies of their actual behaviour show, in practice they possess a certain stiffness that depends on their structural configuration.

NRU MGSU has developed a quick-assembly contact beam-to-column joint that does not require welding or bolting on site. The joint is formed by placing the beam into special components, namely sockets welded to the column under factory conditions. In this beam-to-column connection, forces are transferred through the contact interaction of the supporting joint components, or the dovetail system.

Modern metalworking capabilities enable the production of frame members with such embedded components, thereby facilitating rapid and simple erection of the steel frame and substantially reducing the construction period [1–3].

This study examines the actual behaviour of a quick-assembly contact beam-to-column joint of the dovetail type in the steel frame of a multi-storey building.

MATERIALS AND METHODS

Problem statement

Consider a quick-assembly beam-to-column joint based on the dovetail system. The beam section is a rolled I-beam 20B1, with a $150 \times 100 \times 10$ mm support rib; the column section is a square cold-formed welded hollow section 200×8 mm, with a $190 \times 160 \times 20$ mm support socket and a seating slot of $140 \times 105 \times 15$ mm (Fig. 1–3). The beam is installed by placing its support ribs into sockets welded to two columns. The material is S345K steel.

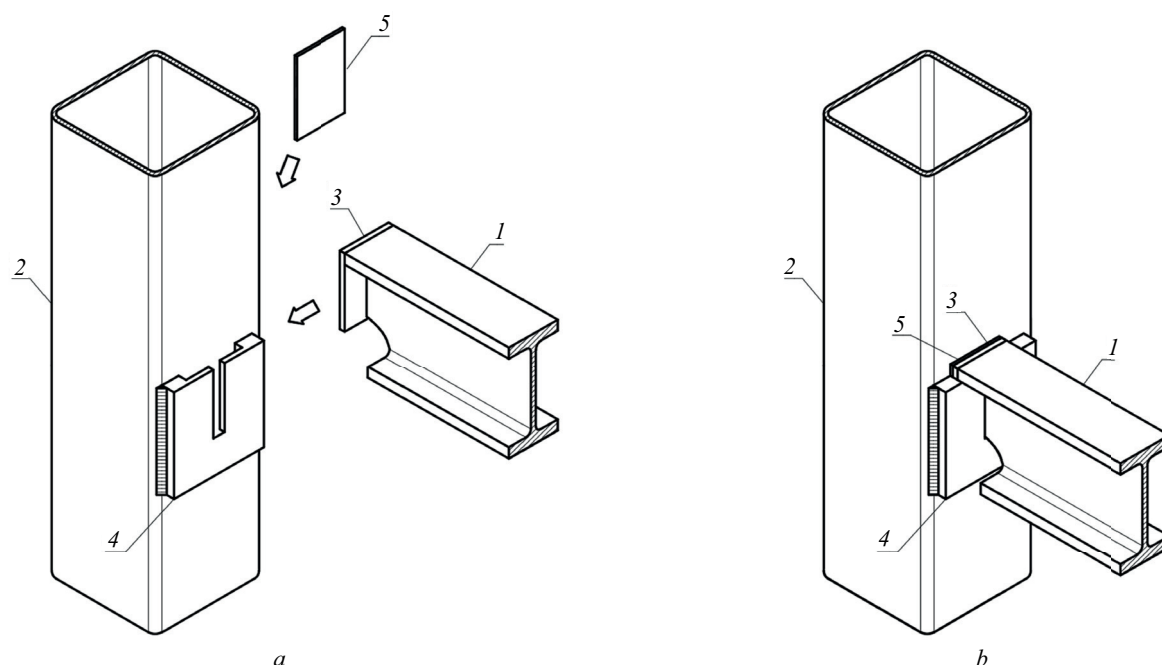


Fig. 1. Assembly diagram of the beam-to-column joint based on the dovetail system: *a* — disassembled joint; *b* — assembled joint; 1 — beam; 2 — column; 3 — support rib; 4 — support socket; 5 — shim plate

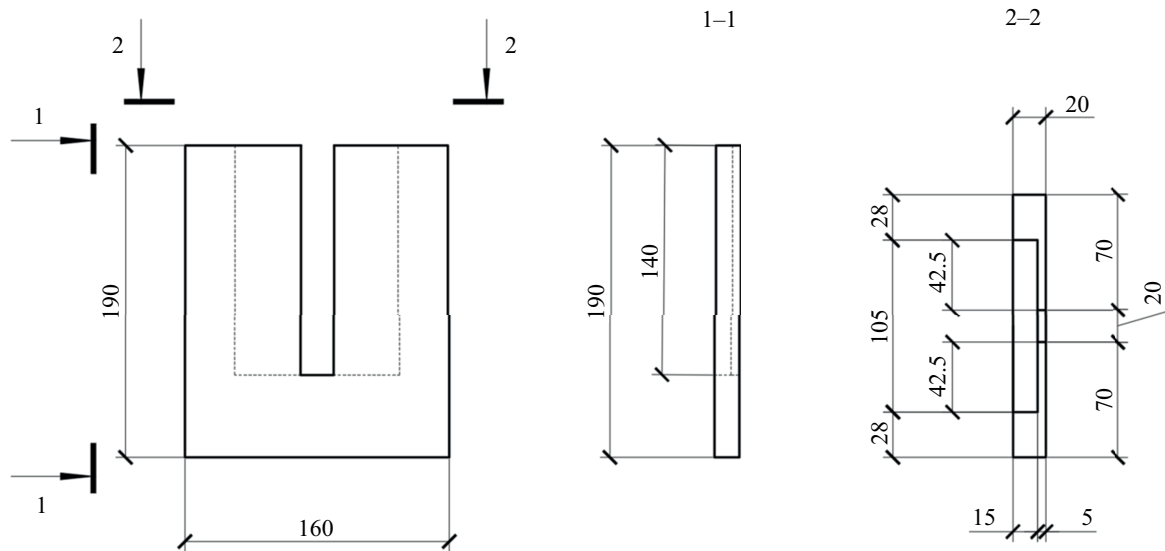


Fig. 2. Dimensions of the support socket welded to the column

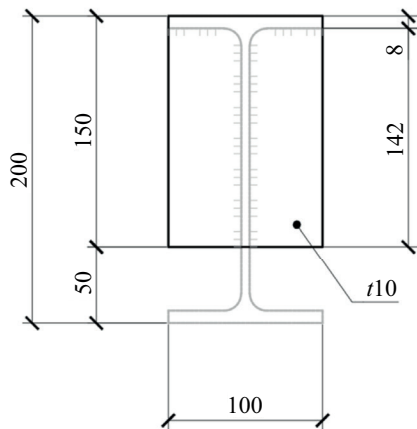


Fig. 3. Dimensions of the support rib welded to the beam

The connection has two gaps: Δ_1 is between the column wall and the support rib, and Δ_2 is between the support rib and the support-socket plates (Fig. 4). Gap Δ_1 is tightly filled in situ with shim plates to prevent the longitudinal displacement of the beam. The remaining gap Δ_2 is small [4–7].

It is assumed that gap Δ_1 is completely filled and gap Δ_2 is equal to zero, which corresponds to a perfectly tight fit. Thus, when a transverse load acts on the beam, a bending moment M of a certain magnitude arises at the supports; this magnitude depends on the compliance of connection C .

Bending moment M develops under the lateral loading of the beam; the beam support rib and the support-socket plates deform while resisting rotation. Horizontal displacement Δ and rotation angle φ occur in the plane of the beam web about point O , causing significant shear stresses in the zone where the retaining plate is fixed to the support socket [8–10].

For this connection, it is necessary to determine:

- 1) the limiting bending moment M_{lim} ;

- 2) the rotation angle φ of the beam support section;

- 3) the beam fixity coefficient C and the actual distribution of bending moment M in the beam.

The solution uses the kinematic method of the theory of limit equilibrium, which may be formulated as follows: for a given statically indeterminate system subjected to a specified type of load, the limiting load P_{lim} corresponding to the distribution of bending moments for any possible failure mechanism is always greater than or equal to the actual failure load; in other words, among all failure modes, the true one is the mode corresponding to the smallest limiting load P_{lim} [11].

According to this method, among all possible single-degree-of-freedom failure mechanisms, the equilibrium equation must be written according to the Lagrange's principle for the displacements possible for the given mechanism. In this case, the virtual work of external forces is considered positive and is equal to the product of the force $P_{i,lim}$ and the corresponding linear displacement Δ_p , whereas the virtual work of internal forces, i.e. the limiting bending moments $M_{j,lim}$ arising in plastic hinges, is negative and equal to the product of $M_{j,lim}$ and the rotation angle θ_j characterizing the possible deformation in the j -th hinge:

$$\sum_i P_{i,pr} \Delta_i = \sum_j M_{j,pr} \theta_j.$$

In the solution, the rigid-plastic body diagram is used (Fig. 5), according to which the material is assumed to remain absolutely undeformed until plastic flow develops. This model adequately characterizes the actual behaviour of the structure in the absence of factors restraining the development of deformations in the plastic range. Since plastic deformations can considerably exceed elastic deformations, the use of the rigid-plastic body idealization is justified.

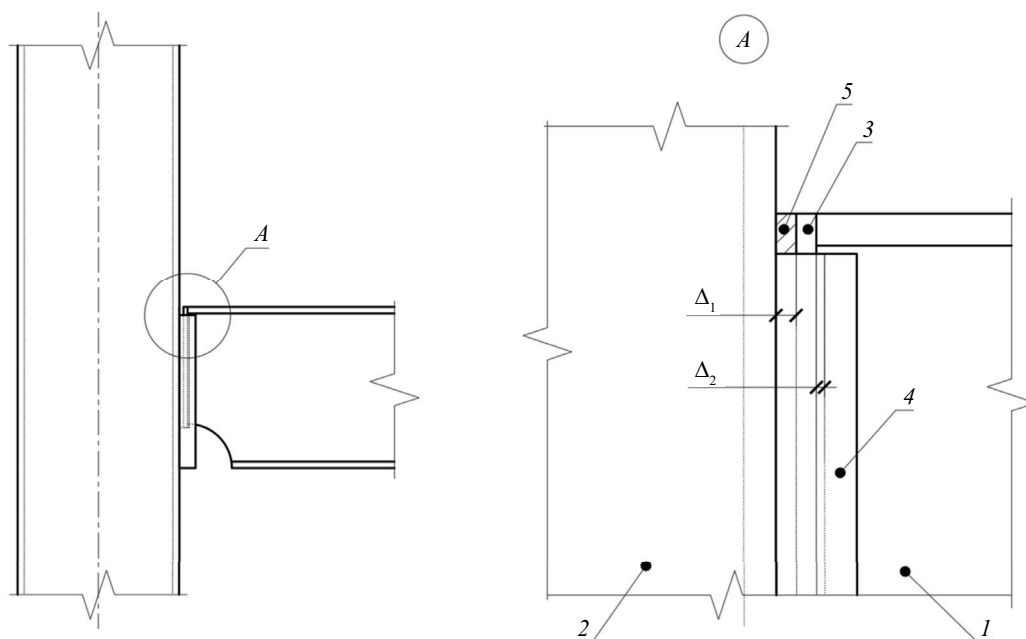


Fig. 4. Gaps in the joint: 1 — beam; 2 — column; 3 — support rib; 4 — support socket; 5 — shim plate

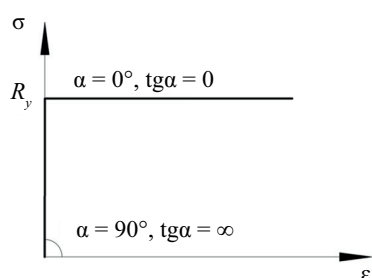


Fig. 5. The $\sigma - \varepsilon$ diagram for a rigid-plastic body

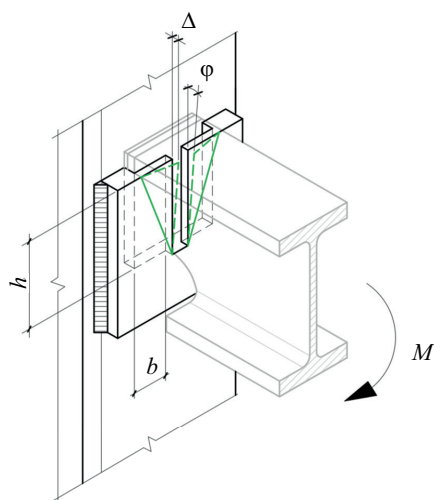


Fig. 6. Kinematic mechanism diagram of the joint

The kinematic mechanism diagram of the joint is shown in Fig. 6.

In the calculation, the support socket is represented as two plates attached to a rigid body and subjected

to out-of-plane bending. The kinematic mechanism of the joint under consideration is based on the following assumptions:

1. The yield lines are linear plastic hinges along which only moment vectors act.
2. The plate is considered rigidly fixed along two adjacent edges and free from restraints along the other two adjacent edges.

Determination of the limiting bending moment M_{lim}

Consider a kinematically admissible state of the support socket under beam bending. In Fig. 7, segment AB corresponds to a linear plastic hinge whose length is:

$$AB = l = \sqrt{b^2 + h^2}.$$

The rotation angle φ in the plane of the beam web is:

$$\varphi \approx \tan \varphi = \frac{\Delta}{h}.$$

Neglecting vertical displacement under the transverse bending of the plate, point C moves horizontally to point C' . The dihedral angle $CABC'$ is:

$$\angle CABC' = \theta \approx \tan \theta = \frac{\Delta}{x} = \frac{\Delta \sqrt{b^2 + h^2}}{bh}.$$

For two plates, the work of internal forces is determined by the following expression:

$$U = 2 \int_0^l M_{pl} \theta dL \approx 2 M_{pl} \sum \theta_i l_i,$$

where $M_{pl} = R_y W_{pl} = \sigma_t t^2/4$ is the unit limiting bending moment at which yielding occurs; R_y denotes the design yield strength of steel; t denotes the plate thickness; l denotes the length of the linear plastic hinge; and l_i is the el-

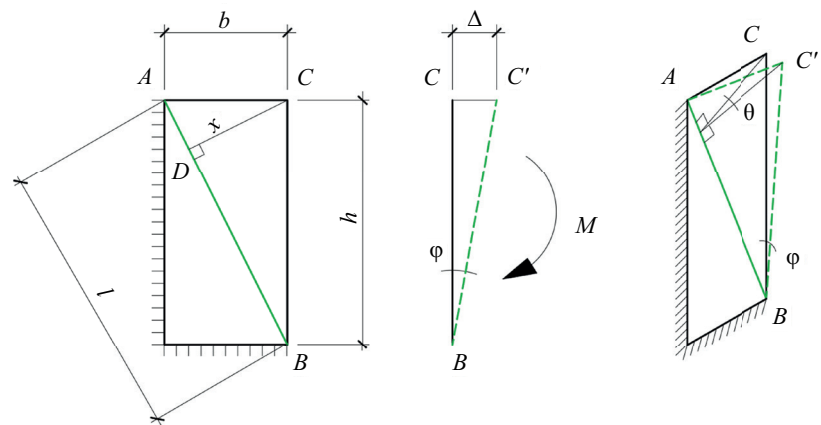


Fig. 7. Plastic hinge diagram in the joint for one of the two support-socket plates

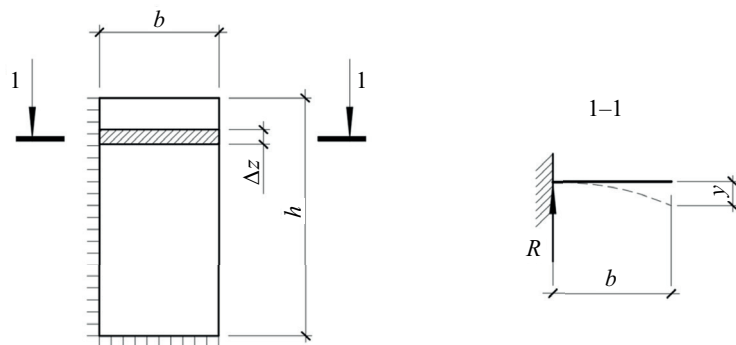


Fig. 8. Design diagram of the plate

ementary kink angle and the corresponding elementary length of the linear hinge.

Then the expression conveying the work of internal forces in the plate takes the form:

$$U = 2 \frac{R_y t^2}{4} \cdot \frac{\Delta \sqrt{b^2 + h^2}}{bh} \cdot \sqrt{b^2 + h^2} =$$
$$= 2 \frac{R_y t^2}{4} \cdot \frac{\Delta}{bh} \cdot (b^2 + h^2) = \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{b} \cdot \frac{b^2 + h^2}{h}.$$

The work of external forces is:

$$A = M \varphi = M \frac{\Delta}{h}.$$

Equating the expressions for the work of external and internal forces gives:

$$M \frac{\Delta}{h} = \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{b} \cdot \frac{b^2 + h^2}{h},$$

from which the limiting bending moment resisted by the support joint can be determined:

$$M_{lim} = \frac{R_y t^2}{2} \cdot \frac{b^2 + h^2}{b}.$$

Determination of the beam fixity coefficient C

To determine the joint stiffness C, consider an elementary horizontal cantilever strip of the plate that has width Δz (Fig. 8).

The horizontal reaction caused by displacement of the free edge is:

$$R = \frac{3EJ}{b^3} \cdot y = \frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot y,$$

where E denotes the modulus of elasticity of steel; $J = \Delta z \times t^3/12$. denotes the moment of inertia of the elementary strip; b and t — width and thickness of the plate.

The rotation angle of the plate at the fixed edge is variable and is determined as follows (Fig. 9):

$$\gamma \approx \text{tg} \gamma \approx y/z.$$

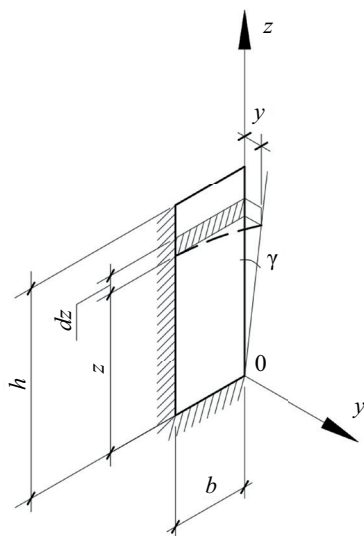


Fig. 9. Plate deformation diagram

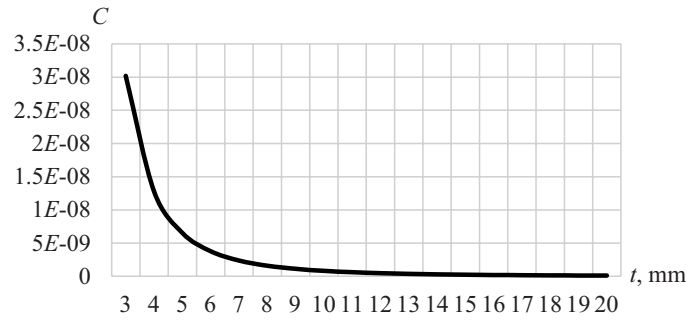


Fig. 10. Dependence of the beam fixity coefficient C on plate thickness t

Hence

$$y = \gamma \cdot z.$$

Then:

$$R = \frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot \gamma \cdot z.$$

Assuming, for simplicity, that the strips of width Δz are not connected to one another, the expression for the specific bending moment $\bar{M}$, corresponding to a unit rotation angle of the beam support section in the joint, can be written as:

$$\begin{aligned} \bar{M} = \frac{M}{\gamma} &= 2 \int_0^h \frac{R z dz}{\gamma \Delta z} = 2 \int_0^h \left(\frac{E \cdot \Delta z \cdot t^3}{4b^3} \cdot \gamma \cdot z \right) \frac{z dz}{\gamma \Delta z} = \\ &= \frac{2E \cdot t^3}{4b^3} \int_0^h z^2 dz = \frac{E}{2} \left(\frac{t}{b} \right)^3 \cdot \frac{h^3}{3} = \frac{E}{6} \left(\frac{t \cdot h}{b} \right)^3. \end{aligned}$$

The beam fixity coefficient is the reciprocal of the specific bending moment corresponding to a unit rotation angle of the beam support section in the joint. Therefore, the expression for the beam fixity coefficient is:

$$C = \frac{1}{\bar{M}} = \frac{6}{E} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3.$$

Fig. 10 shows the dependence of the beam fixity coefficient C on the plate thickness t (parameters b and h are taken as constant values). The curve is a cubic hyperbola.

RESULTS

Determination of support moments in girders and rotations of their support sections

To determine the support moments in the beam and the rotations of its support sections, a stepped-stiffness beam elastically restrained at the supports and loaded by two concentrated forces $P/2$ at a distance d from the beam end is used as the design diagram (Fig. 11). The influence of column stiffness is assumed to be insignificant.

The length m indicated in Fig. 11 is equal to the thickness of the retaining plate, i.e. $m = t$.

The degree of static indeterminacy of the given system is 1. The support moment in the girder is determined by the force method. The primary system is a classical simply supported beam (Fig. 12, *a*), in which the bending moment at the supports is taken as the symmetric unknown X_1 . The canonical equation of the force method is written as:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} + \varphi = 0.$$

The left-hand side of the equation describes the total support rotation angle, where φ denotes the part of this angle that depends on the beam fixity coefficient, determined above: $\varphi = c \cdot X_1$.

Then the canonical equation of the force method takes the form:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} + C \cdot X_1 = 0.$$

The unit bending-moment diagram $\bar{M}_1$ and the load bending-moment diagram M_P are shown in Fig. 12, *b* and 12, *c*.

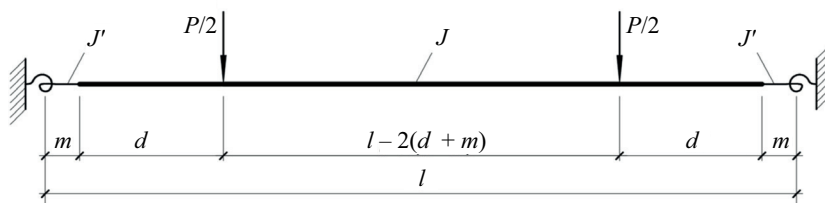


Fig. 11. Design diagram of a stepped-stiffness beam elastically restrained at the supports

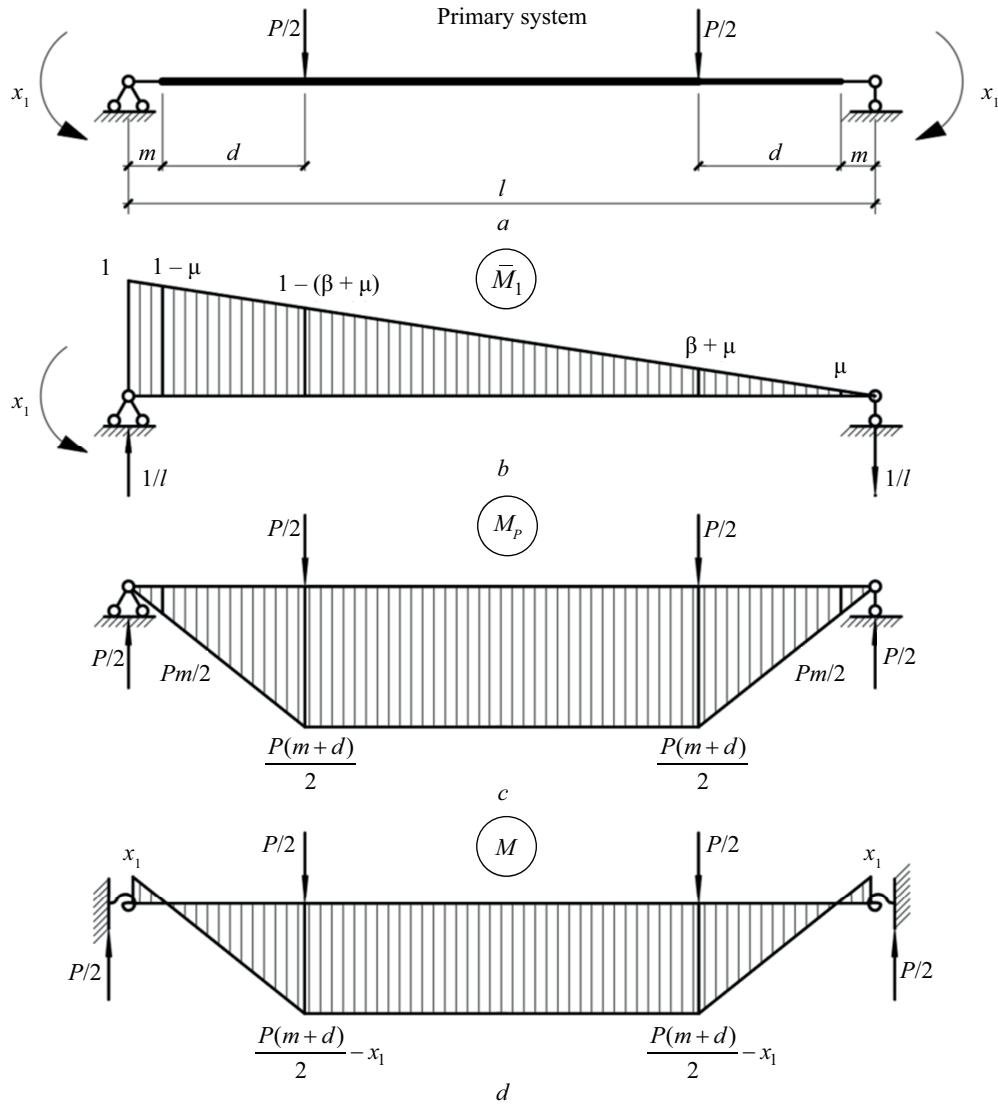


Fig. 12. Beam analysis by the force method: *a* — primary system; *b* — unit bending-moment diagram; *c* — load bending-moment diagram; *d* — final bending-moment diagram

The coefficients δ_{11} and Δ_{1P} are determined by the Maxwell – Mohr formula using the Vereshchagin’s rule:

$$\delta_{11} = \sum \int \frac{\bar{M}_1^2 dx}{EJ} = 2 \frac{m \cdot 1 \cdot 1}{EJ'} + \frac{(l-2m) \cdot 1 \cdot 1}{EJ};$$

$$\Delta_{1P} = \sum \int \frac{M_P \bar{M}_1 dx}{EJ} =$$

$$= - \frac{P(m+d)}{4EJ} (l-2(m+d)) \cdot 1 -$$

$$- \left[\frac{P(m+d)}{2} + \frac{Pm}{2} \right] \cdot d \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{Pm}{2} \cdot \frac{m}{EJ'}.$$

If it is assumed that:

$$J' = \alpha \cdot J; \quad m = \mu \cdot l; \quad d = \beta \cdot l,$$

then the expressions for δ_{11} and Δ_{1P} can be rewritten as:

$$\delta_{11} = \frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right];$$

$$\Delta_{1P} = - \frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right].$$

The unknown X_1 is determined as:

$$X_1 = - \frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11} + C'};$$

$$X_1 = \frac{\frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right]}{\frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right] + \frac{6}{E} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3}.$$

Values of bending moments and rotations of support sections for different design diagrams

Number	Design diagram and bending-moment diagram	Span l , m	Distance a , m	Support moment M_s , kN·m	Span moment M_{sp} , kN·m	Support rotation φ_s , rad	Note
1		3.0	0.75	0	75	0.0222 (φ_s^p)	—
2		4.5	1.125	0	112.5	0.05 (φ_s^p)	—
3		6.0	1.5	0	150	0.0888 (φ_s^p)	—
4		$t = 5$ mm	3.0	3.27	71.73	0.0213	$M_s^e = 8.73 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 96.12 \% \varphi_s^p$
5			4.5	7.23	105.27	0.0471	$M_s^e = 12.85 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 94.29 \% \varphi_s^p$
6			6.0	12.61	137.39	0.0822	$M_s^e = 16.81 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 92.53 \% \varphi_s^p$
7		$t = 10$ mm	3.0	20.60	54.40	0.0168	$M_s^e = 54.94 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 75.58 \% \varphi_s^p$
8			4.5	41.31	71.19	0.0337	$M_s^e = 73.44 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 67.36 \% \varphi_s^p$
9			6.0	66.23	83.77	0.0540	$M_s^e = 88.31 \% M_s^r$ $\varphi_s^e = 60.75 \% \varphi_s^p$
10		3.0	0.75	37.5 (M_s^r)	37.5	0	—
11		4.5	1.125	56.25 (M_s^r)	56.25	0	—
12		6.0	1.5	75 (M_s^r)	75	0	—

Note: M_s^r and M_s^e are the support moments arising in a beam with rigid or elastic end restraint, respectively; φ_s^p and φ_s^e are the support rotation angles arising in a simply supported or elastically restrained beam, respectively.

After simplifying the resulting expression and neglecting the component μ because of its small magnitude compared with unity, one can write:

$$X_1 = \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + 24 \cdot \frac{J}{l} \left(\frac{b}{t \cdot h} \right)^3}.$$

Given that $2 \frac{th^3}{12} = \alpha \cdot J$, the final formula for determining the support moment in a beam with dovetail-type joints can be written as:

$$M_{op} = \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + \frac{4b}{\alpha \cdot l} \left(\frac{b}{t} \right)^2}.$$

The maximum bending moment in the span for the two-point bending diagram is:

$$M_{pr} = \frac{P(t+d)}{2} - \frac{Pl \left[\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta) \right]}{\frac{4}{3} + 4\mu \left(\frac{1}{\alpha} - 1 - \frac{4}{3}\beta \right) + \frac{4b}{\alpha \cdot l} \left(\frac{b}{t} \right)^2}.$$

The final bending-moment diagram is shown in Fig. 12, d.

The beam rotation angle at the support, which depends on the elastic properties of the joint, can be determined as follows:

$$\varphi = C \cdot X_1; \quad X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11} + C};$$

$$\varphi = -\frac{\Delta_{1P}}{\frac{\delta_{11}}{C} + 1} =$$

$$= \frac{\frac{Pl^2}{4EJ} \left[\mu \left(1 - 2\mu + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - 2\mu - \beta) \right]}{\frac{l}{3EJ} \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right] + 1} = \frac{Pl^2}{4EJ} \cdot \frac{\mu \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \beta (1 - \beta)}{1 + \frac{\alpha t^2 l}{3b^3} \cdot \left[1 + \mu \left(\frac{3}{\alpha} - 3 - 4\beta \right) \right]}.$$

Using the expressions obtained, the behaviour of a beam elastically restrained at both ends can be com-

pared with the classical cases: a simply supported beam and a beam rigidly fixed at both ends [12–15]. The table presents the values of bending moments and rotation angles of support sections for different calculation cases [16–20]. Beam spans of 3, 4.5 and 6 m are considered; two concentrated forces are applied at a distance $a = l/4$ from the supports. For the elastically restrained beam, the moments and rotation angles were determined for $b = 42.5$ mm, $h = 140$ mm, and $t = 5$ and 10 mm. The beam section is a rolled I-beam 20B1 according to GOST R 57837–2017. The force P is taken as 200 kN.

CONCLUSION

Based on the kinematic method of the theory of limit equilibrium, expressions were obtained for determining the limiting bending moment M_{lim} and the beam fixity coefficient C for the contact beam-to-column joint with a dovetail connection.

Using the force method, the actual bending-moment diagram was constructed for a beam elastically restrained at both ends and loaded by two concentrated forces arranged symmetrically with respect to the supports.

A formula was obtained for determining the rotation angle φ of the beam support section for the contact beam-to-column joint of the dovetail type.

Based on the comparison with the classical beam support cases, namely hinged supports and rigid end fixities, it was established that the joint under consideration with a socket-plate thickness $t = 5$ mm is almost completely pinned. In this case, a significant support rota-

tion occurs: for the span $l = 3$ m it amounts to 96.12 % of the support rotation angle for the simply supported diagram, for the span $l = 4.5$ m to 94.29 %, and for the span $l = 6$ m to 92.53 %. The support bending moments occurring in the diagram with elastic end restraints are 8.73 % of those in the diagram with rigid end fixities for the span $l = 3$ m, 12.85 % for the span $l = 4.5$ m, and 16.81 % for the span $l = 6$ m. Thus, for engineering calculations it may be assumed that, when a compliant joint with retaining plates of thickness $t = 5$ mm is used, the ratio between the support and span moments is 1:10.

For the case in which the socket-plate thickness is taken as $t = 10$ mm, the stiffness of the joint increases. In this case, the support rotation angle is 75.58 % of the support rotation angle for the simply supported diagram and the span $l = 3$ m, 67.36 % for the span $l = 4.5$ m, and 60.75 % for the span $l = 6$ m. The support bending moments in the beam with elastic end restraints are 54.94 % of those in the diagram with rigid end fixities for the span $l = 3$ m, 73.44 % for the span $l = 4.5$ m, and 88.31 % for the span $l = 6$ m. Consequently, the use of such retaining plates allows the beam end restraints to be regarded as semi-rigid and contributes to reducing span moments; however, it should be noted that this increases the metal consumption of the joint.

The quick-assembly joint under study accelerates the erection of steel-frame members on site, while the characteristics determined above allow the actual behaviour of the joint to be taken into account in structural analysis. The proposed contact beam-to-column joint can be recommended for practical engineering applications.

REFERENCES

1. Kukla D., Kozłowski A., Ślęczka L., Wójcik-Grząba I., Nykiel D., Gubernat S. Innovative steel beam-to-column joint under central column loss situation: Experimental tests and analytical model. *Engineering Structures*. 2025; 326:119513. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119513. EDN DXUCZE.
2. Zhang Z.W., Li D., Wang H.J., Qian H.L., Fang W.Q., Jing X.F. et al. Study of mechanical properties of a novel column-beam-column prefabricated steel frame joint. *Advanced Steel Construction*. 2024; 20(4):330-344. DOI: 10.18057/ijasc.2024.20.4.2
3. Shi G., Liu M., Luo J., Zhao H. Experimental study on the seismic behavior of steel joints between I-beam and box-T built-up section columns. *Thin-Walled Structures*. 2025; 216:113626. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113626. EDN SEAQTN.
4. Sun G., Mironova L.I. Influence of rotational stiffness of beam-to-column connection on steel frame performance. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025; 21(6):537-550. DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-6-537-550. EDN FOHZXB. (rus.).
5. Jakovljević I., Dobrić J., Gluhović N., Spremić M. Beam-to-column joint solutions for reusable moment-resisting steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2026; 238:110163. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.110163. EDN AWZYWD.
6. Elhout E.A. Effect of beam-column connection types on the response modification factors of steel frames. *International Journal of Steel Structures*. 2024; 24(1):132-143. DOI: 10.1007/s13296-023-00805-4. EDN QJSLTJ.
7. Piskulic M., Vujanac R., Vulović S., Miloradovic N., Blagojevic M., Djordjevic Z. Structural Performance of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections in Steel Storage Racks: A Review Focused on FEM Analysis. *Metals*. 2026; 16(1):2. DOI: 10.3390/met16010002. EDN ZOHPCX.
8. Tushina V.M. *Load-bearing capacity and deformability of malleable components of steel frames of multi-storey buildings : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 1989; 166. (rus.).
9. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams. *23rd Australian Confer-*

ence on the Mechanics of Structures and Materials. 2014; 701-706.

10. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.

11. Anokhin N.N. Structural mechanics in examples and tasks. Part II. Statically indeterminate systems : textbook. 4th edition, expanded and revised. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 464. (rus.).

12. Glebov F.A., Astakhov I.V., Korsun V.I., Kondratyeva L.N., Tsyganovkin V. Analytical model of the method of variable elasticity parameters for flange beam to column connections. *Engineering journal of Don*. 2024; 1(109):462-496. EDN QHDFKI. (rus.).

13. Nie R., Li Y., Bai Y., Mou B., Zhou Ya. HSS steel corner column to H-beam joints under cyclic bidirectional loadings: Experiment, numerical modeling, and calculation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 192:107239. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107239. EDN PUAQCH.

14. Lian Ju.Yi., Deng En.F., He J.M., Cai Li.M., Gao Sh.C., Zhou Ji.J. Numerical analysis on seismic performance of corner fitting connection in modular steel building. *Structures*. 2021; 33:1659-1676. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.05.044. EDN ZHINRZ.

15. Celik H., Şakar G. Semi-rigid connections in steel structures: State-of-the-art report on modelling, anal-

ysis and design. *Structural Engineering and Mechanics*. 2022; 45(1).

16. Yin T., Wang Zh., Zheng K., Lu Sh. A new method for design of the semi-rigid steel frame — the integration of joint inverse design and structural design. *Buildings*. 2022; 12(7):938. DOI: 10.3390/buildings12070938. EDN MRTYXE.

17. Rodríguez González C.A., Caparrós-Manceira Ju.J., Hernández-Torres J.A., Rodríguez-Pérez Á.M. Nonlinear analysis of rotational springs to model semi-rigid frames. *Entropy*. 2022; 24(7):953. DOI: 10.3390/e24070953. EDN FFTQGF.

18. Al-Sherif R.H., Ismael M.A. Effect of semi-rigid beam-column connection on structural behavior of steel frames. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2784:020008. DOI: 10.1063/5.0140815

19. Elhout E.A. Effect of beam-column connection types on the response modification factors of steel frames. *International Journal of Steel Structures*. 2024; 24(1):132-143. DOI: 10.1007/s13296-023-00805-4. EDN QJSLTJ.

20. Piskulic M., Vujanac R., Vulović S., Miloradovic N., Blagojevic M., Djordjevic Z. Structural Performance of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections in Steel Storage Racks: A Review Focused on FEM Analysis. *Metals*. 2026; 16(1):2. DOI: 10.3390/met16010002. EDN ZOHPCX.

Received April 20, 2026.

Adopted in revised form on April 28, 2026.

Approved for publication on May 12, 2026.

B I O N O T E S : **Ivan V. Mylnikov** — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3437-1337; ID RSCI: 1234163, Scopus: 60572662500, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru;

Valentina M. Tusnina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7716-5978, ID RSCI: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; tusninavm@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

Интеграция результатов строительного контроля
в информационную модель объекта капитального
строительства для создания его цифрового двойника

Виктор Сергеевич Евстратов, Алексей Петрович Стрелков,
Евгения Александровна Гинзбург, Егор Максимович Железнов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства (ЖЦ ОКС) представляет собой комплексный процесс, эффективность которого в современных условиях определяется степенью цифровизации и интеграции данных на всех этапах — от проектирования до утилизации. Ключевым инструментом выступает информационное моделирование (BIM/TIM), однако потенциал его применения в строительном контроле реализован недостаточно, что приводит к разрыву информационной преемственности между этапами строительства и эксплуатации. Цель исследования — обоснование необходимости интеграции строительного контроля в единую цифровую среду на базе информационной модели (ИМ) как механизма верификации данных и создания достоверного цифрового двойника объекта.

Материалы и методы. Применен аналитический обзор для синтеза информации из научно-технической литературы, нормативных документов и отраслевых публикаций, посвященных управлению ЖЦ ОКС, информационному моделированию и использованию связанных технологий.

Результаты. Определено содержание ИМ на каждом этапе ЖЦ. Установлена прямая зависимость между типом производства (единичное, серийное, массовое) и необходимым уровнем атрибутивной насыщенности модели. Показано, что строительный контроль является критическим аспектом для трансформации проектной модели в исполнительную, поскольку именно на этапе строительства происходит фиксация фактических параметров, сведений о материалах, отклонениях и скрытых работах. Без внесения информации строительного контроля в ИМ ее использование на этапе эксплуатации становится неэффективным.

Выводы. Интеграция строительного контроля в процесс информационного моделирования обеспечивает информационную преемственность на всем протяжении ЖЦ ОКС, что создает основу для автоматизации управления, применения предиктивной аналитики, снижения эксплуатационных затрат и повышения прозрачности строительства. Дальнейшее развитие управления ЖЦ ОКС связано с углубленным использованием искусственного интеллекта и роботизации, для которых структурированные атрибутивные данные служат необходимым базисом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жизненный цикл объекта капитального строительства, информационное моделирование, BIM, TIM, строительный контроль, цифровой двойник, атрибутивность, управление качеством, среда общих данных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Евстратов В.С., Стрелков А.П., Гинзбург Е.А., Железнов Е.М. Интеграция результатов строительного контроля в информационную модель объекта капитального строительства для создания его цифрового двойника // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.8

Автор, ответственный за переписку: Виктор Сергеевич Евстратов, evstratov@mgsu.ru.

Integration of construction monitoring results into
the information model of a capital construction
project to create its digital twin

Victor S. Evstratov, Alexey P. Strelkov, Evgeniya A. Ginzburg, Egor M. Zheleznov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The life cycle management of a capital construction project (CCP LC) is a comprehensive process, the effectiveness of which, in today's environment, is determined by the degree of digitalization and data integration at all stages — from design to decommissioning. Information modelling (BIM/TIM) is a key tool; however, its potential for application in construction supervision has not been fully realized, leading to a gap in information continuity between the construction

and operational phases. The aim of this study is to justify the need to integrate construction supervision into a unified digital environment based on an information model (IM) as a mechanism for data verification and the creation of a reliable digital twin of the facility.

Materials and methods. An analytical review was conducted to synthesize information from scientific and technical literature, regulatory documents and industry publications relating to the management of the life cycle of a capital construction project, information modelling and the use of associated technologies.

Results. The IM content has been determined for each stage of the life cycle. A direct relationship has been established between the type of production (one-off, batch, mass) and the required level of attributive richness of the model. It has been shown that construction supervision is a critical aspect for the transformation of the design model into an as-built model, since it is precisely during the construction phase that actual parameters, information on materials, deviations and concealed works are recorded. Without incorporating construction supervision information into the IM, its use during the operational phase becomes ineffective.

Conclusions. The integration of construction supervision into the information modelling process ensures information continuity throughout the entire life cycle of the CCP, which lays the foundation for the automation of management, the application of predictive analytics, the reduction of operational costs and the enhancement of construction transparency. Further development of the life cycle management of the CCP involves the in-depth use of artificial intelligence and robotization, for which structured attribute data serves as an essential foundation.

KEYWORDS: life cycle of a capital construction project, information modelling, BIM, TIM, construction supervision, digital twin, attribution, quality management, common data environment

FOR CITATION: Evstratov V.S., Strelkov A.P., Ginzburg E.A., Zheleznov E.M. Integration of construction monitoring results into the information model of a capital construction project to create its digital twin. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.8

Corresponding author: Victor S. Evstratov, evstratov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Управление жизненным циклом объекта капитального строительства (ЖЦ ОКС) представляет собой комплексный процесс, охватывающий все этапы существования объекта — от первоначальной идеи до вывода его из эксплуатации. Термин «объект капитального строительства» применяется к объектам на всех этапах ЖЦ, кроме этапа эксплуатации, где возникает термин «объект недвижимости» [1]. При этом набор методов и средств управления ОКС динамически изменяется по мере прохождения этапов его ЖЦ [2–4].

Основой является информационное моделирование зданий (BIM в зарубежной, либо TIM в отечественной литературе) [5–7]. Этот подход предполагает создание детальной цифровой 3D-модели объекта на этапе проектирования, которая в дальнейшем служит единым источником данных на всем его жизненном пути. Однако, несмотря на широкое распространение использования технологий информационного моделирования на этапе проектирования, их потенциал на последующих стадиях, особенно в ходе строительного контроля, реализован не полностью.

Цель исследования — обоснование необходимости интеграции строительного контроля в единую цифровую среду на базе информационной модели (ИМ) как механизма верификации данных и создания достоверного цифрового двойника объекта, для достижения которой следует:

- систематизировать информацию по применению технологий информационного моделирования на этапах ЖЦ;
- выявить зависимость степени детализации (атрибутивности) модели от типа строительного производства;

- обосновать ключевую роль строительного контроля, как механизма верификации и наполнения модели на этапе строительства, для формирования достоверного цифрового двойника ОКС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применен аналитический обзор для синтеза информации из научно-технической литературы, нормативных документов и отраслевых публикаций, посвященных управлению ЖЦ ОКС, информационному моделированию и использованию связанных технологий. Рассмотрены следующие подходы и инструменты:

- информационное моделирование (BIM/TIM) — базовый метод создания и ведения цифрового описания объекта;
- среды общих данных (CDE) — платформы для коллективной работы (Autodesk Construction Cloud, Trimble Connect и др.), обеспечивающие единое хранилище актуальной информации;
- цифровые двойники (Digital Twins) — динамические виртуальные копии объекта, обновляемые в реальном времени данными с датчиков интернета вещей (IoT) [8, 9];
- системы управления — автоматизированные системы управления объектами недвижимости (CAFM), корпоративные системы планирования ресурсов (ERP), системы управления цепочками поставок (SCM);
- аналитические методы, такие как анализ стоимости жизненного цикла (LCC), управление рисками (FMEA, SWOT-анализ), экологическая сертификация (LEED, BREEAM), а также перспективные технологии — блокчейн для обеспечения неизменности записей, искусственный интеллект (ИИ) для оптимизации решений, геоинформационные системы (ГИС) для инфраструктурных проектов [10–12].

Особое внимание уделено понятию атрибутивности информационной модели, т.е. способности элементов модели содержать не только геометрические, но и семантические данные (физические, технические, экономические, эксплуатационные характеристики). С целью анализа влияния типа производства на требуемый уровень атрибутивности выделены три категории: единичное (уникальные объекты), серийное (типовые здания) и массовое (крупные жилые массивы, сетевые объекты) строительство.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационная модель на этапах ЖЦ ОКС

В результате проведенного анализа определено содержание ИМ на основных этапах ЖЦ (табл.).
Управление ЖЦ ОКС структурируется аналогично в соответствии со стандартизированными этапами, где используются специализированные системы, включая среды общего доступа к данным (CDE), к примеру Autodesk Construction Cloud или Trimble Connect, системы автоматизированного управления объектами недвижимости (CAFM), IBM Maximo или ESTRON и корпоративные системы планирования ресурсов (ERP), такие как SAP или 1C:ERP, которые играют ключевую роль в управлении финансами, материальными ресурсами, логистикой и сроками.

Повышение эффективности процесса управления на этапе эксплуатации обеспечивают цифровые двойники [8, 9], представляющие собой динамические виртуальные копии объекта, обновляемые в реальном времени данными с датчиков IoT.
Управление цепочками поставок (SCM) минимизирует простои и риски дефицита материалов на всех этапах, а LCC позволяет оценить не только первоначальные инвестиции, но и все будущие эксплуатационные расходы, затраты на обслуживание и вывод из эксплуатации, обеспечивая экономическую обоснованность решений. Параллельно применяются методы управления рисками, такие как FMEA или SWOT-анализ, а также страхование, для минимизации потенциальных угроз проекту [10].
Современное управление ЖЦ ОКС также уделяет большое внимание устойчивому развитию, где экологические стандарты, такие как LEED и BREEAM, задают требования по энергоэффективности, использованию экологичных материалов и минимизации отходов на протяжении всего цикла. Для повышения прозрачности процессов все чаще применяются блокчейн-технологии, обеспечивающие неизменность записей в контрактах, цепочках поставок и документации [11].
Автоматизация и ИИ проникают во все аспекты ЖЦ объекта строительства: от оптимизации проектных решений и прогнозирования сроков до управ-

Применение информационного моделирования на этапах ЖЦ ОКС

Этап ЖЦ	Целевая функция	Субъекты управления	Наполнение	Основные потребители
Этап технико-экономического обоснования и проектирование	Верификация объемно-планировочных и конструктивных решений, выявление коллизий на ранних стадиях, оптимизация сметной стоимости	Проектные организации, главный инженер проекта, BIM-координаторы	Геометрические параметры, спецификация материалов, инженерные сети, временные показатели (4D), стоимостные показатели (5D)	Экспертные органы, технический заказчик, подрядные организации
Строительство	Актуализация проектных решений в соответствии с фактически выполненными работами, формирование исполнительной документации в цифровой среде	Генеральный подрядчик, технический надзор, геодезическая служба	Фактические геометрические параметры, паспорта и сертификаты материалов, акты освидетельствования скрытых работ, фотофиксация дефектов	Эксплуатирующие организации, службы технической инвентаризации
Реконструкция	Оценка физического износа	Оценка физического износа, планирование демонтажных работ	Собственники	Актуальная структура несущих элементов
Утилизация	Планирование демонтажных работ, сортировка материалов для вторичной переработки	Сортировка материалов для вторичной переработки	Собственники, специализированные организации по сносу, экологический контроль	Данные о материалах, скрытые коммуникации

ления роботизированной техникой на стройплощадке. Геоинформационные системы интегрируются для управления инфраструктурными проектами [12].

Таким образом, эффективное управление ЖЦ строительного объекта достигается за счет интеграции таких ключевых подходов и технологий, как информационное моделирование, использование данных от IoT-сенсоров и цифровых двойников, применения продвинутых систем управления (ERP, CAFM) и аналитики (LCC), а также внедрения принципов устойчивого развития и автоматизации. При этом основным направлением является создание единой цифровой среды, где все эти технологии работают согласованно, обеспечивая сквозную прозрачность, эффективность и контроль от концепции до утилизации [13].

Взаимосвязь атрибутивности информационной модели и типа строительного производства

Под атрибутивностью примем свойство объектов информационной модели (BIM-модели) содержать в себе не только геометрические сведения (форму, размеры, положение в пространстве), но и семантически насыщенные данные (атрибуты), которые описывают их физические, технические, экономические и эксплуатационные характеристики. На рис. 1 показан пример заполнения атрибутивной информации для светопрозрачной ограждающей конструкции.

Степень детализации и насыщенности атрибутивной информацией 3D-модели здания находится в прямой зависимости от стандартизации и индустриализации строительного производства. Атрибутивность подразумевает под собой не просто гео-

метрию объекта, а комплекс параметров и данных, привязанных к каждому элементу модели, таких как материал, производитель, срок службы и др. При этом ценность этой информации напрямую определяется типом производства [14, 15].

По мере увеличения степени детализации цифровая информационная модель (ЦИМ) наполняется различными сведениями, что ожидаемо приводит к увеличению размера файла ЦИМ. В качестве примера приведен график изменения размера файлов по мере насыщения модели информацией от описания задачи до модели на уровне детализации LOD 400 (рис. 2); на рис. 3, а представлена 3D-модель коттеджа на уровне детализации LOD 400, где добавлены атрибуты в каждый элемент модели (рис. 3, б).

Стоит отметить, что в условиях единичного производства (уникальные объекты) приоритет отдается визуализации сложной геометрии и проверке коллизий. В таких проектах атрибутивность развита слабо, а информация, как правило, не стандартизирована и редко используется после этапа строительства.

Для серийного производства (типовые жилые дома, склады) характерен высокий и обязательный уровень атрибутивности. Создаются библиотеки элементов с заранее заполненными атрибутами, модель служит базой для автоматического формирования спецификаций, смет, заказов материалов.

В массовом производстве (микрорайоны, сетевые объекты) атрибутивность достигает максимума. Каждый элемент снабжается уникальным идентификатором, увязывающим сведения о производстве, монтаже и обслуживании. Модель становится циф-

Свойства	
Свойство	Значение
Вид остекления	Двойное остекление
Класс по воздухо- и водопроницаемости	A
Класс по общему коэффициенту	3
Класс по приведенному сопротивлению	C
Класс по звукоизоляции изделия	C
Класс по сопротивлению	C
Конструктивное исполнение изделия	Распашное
Масса	200,00 кг
Материал подоконной доски	-
Материал рамочных элементов	ПВХ
Наименование	Окно двустворчатое полутрапецевидное
Обозначение	Правый полутрапецевидный проем
Примечание	
Размер	3200x1800
Сопротивление теплопередаче	1,25
Строительный модуль	100,00 мм

Рис. 1. Пример атрибутов для светопрозрачной ограждающей конструкции

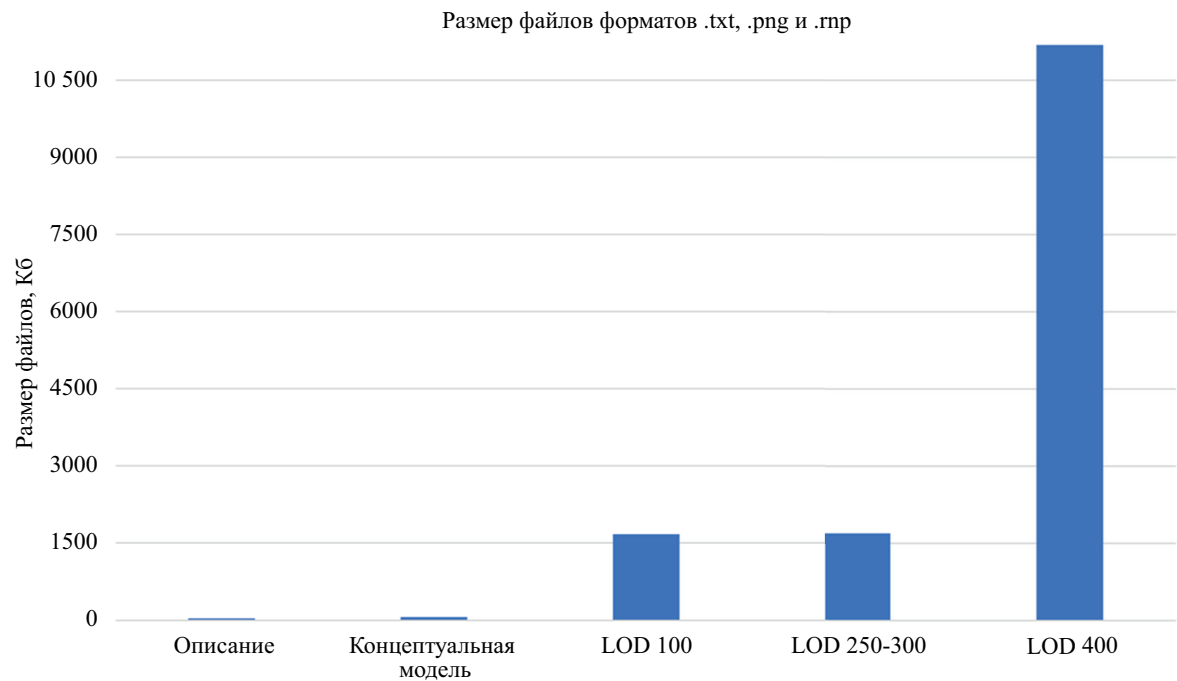


Рис. 2. График изменения объема файла с увеличением степени детализации информационной модели

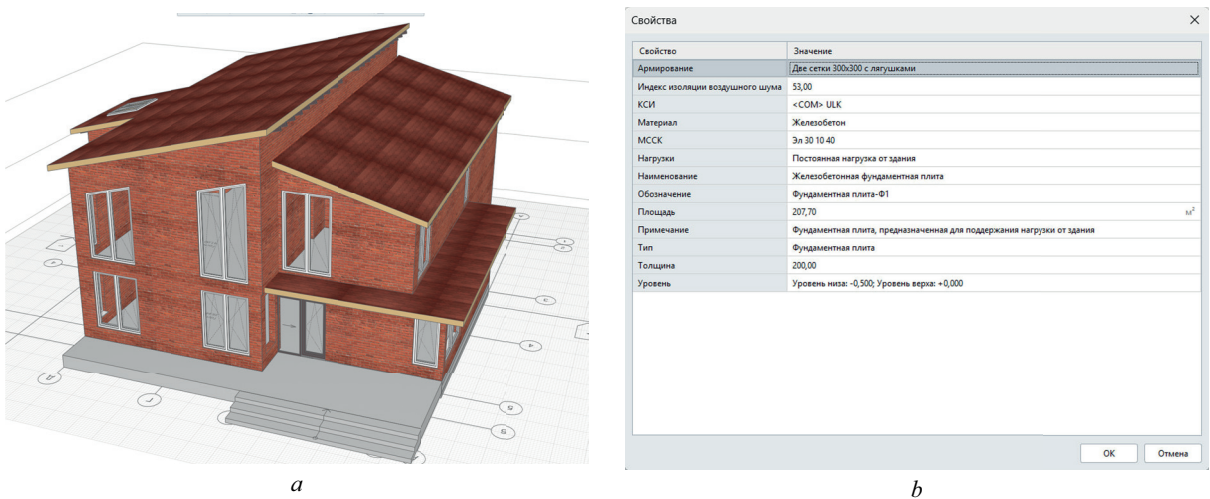


Рис. 3. ЦИМ на уровне детализации LOD 400 (а); пример атрибутов фундаментной плиты в ЦИМ на уровне детализации LOD 400 (б)

ровым двойником, необходимым для эффективного управления однотипными объектами.

Строительный контроль как ключевой этап верификации модели

Проведенный анализ выявил, что именно на этапе строительства происходит критическая трансформация проектной модели в исполнительную, где без качественного строительного контроля, обеспечивающего внесение фактических параметров (результаты геодезических съемок, данные о примененных материалах, акты скрытых работ, фотофиксация дефектов), ИМ не может служить основой для последующего этапа эксплуатации.

Таким образом, использование информационной модели в строительном контроле позволяет:

- устанавливать отклонения на ранней стадии и предотвращать дорогостоящие переделки;
- накапливать сведения о дефектах для анализа типичных проблем;
- синхронизировать информацию между всеми участниками строительства в среде общих данных;
- обеспечивать прозрачность и объективность контроля.

Это приводит к тому, что строительный контроль перестает быть обособленной надзорной функцией и становится механизмом верификации и наполнения информационной модели, необходимым для создания достоверного цифрового двойника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают, что современное управление ЖЦ ОКС динамически развивается от набора разрозненных процессов к целостной технологической экосистеме, в которой ключевым элементом выступает ИМ, степень атрибутивности которой должна соответствовать типу производства и задачам рассматриваемого этапа ЖЦ. Выявленная зависимость напрямую согласуется с мировыми тенденциями, которые подтверждают тезис о том, что в серийном и массовом строительстве стандартизация данных и глубокая атрибутивность становятся обязательным условием автоматизации и роботизации [13].

Особое значение приобретает этап строительного контроля. Зачастую в литературе основное внимание уделяется проектированию и эксплуатации, тогда как промежуточная фаза строительства рассматривается как «черный ящик». Исследование авторов показывает, что именно при строительном контроле закладывается основа для будущего развития информационной модели и ее переход в цифрового двойника. При этом использование ИМ в строительном контроле дает возможность не только повысить качество работ, но и обеспечить информационную преемственность между стадиями ЖЦ.

Интеграция строительного контроля в единую цифровую среду (CDE) открывает возможности для автоматизированного сравнения «как запроектировано» и «как построено» (например, по данным лазерного сканирования); предиктивного анализа рисков на основе накопленных сведений о дефектах; формирования исполнительной документации в цифровом виде, готовой для передачи в эксплуатацию.

Цифровые двойники позволяют мониторить состояние объекта в реальном времени и прогнозировать

отказы. Блокчейн обеспечивает неизменность записей о качестве и происхождении материалов. Искусственный интеллект способен анализировать большие массивы атрибутивных данных для оптимизации проектных и управленческих решений. Однако внедрение этих технологий требует высокого уровня стандартизации и атрибутивности информационной модели, что также подтверждает необходимость качественного строительного контроля.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Эффективное управление ЖЦ ОКС требует создания единой цифровой среды, ядром которой выступает семантически насыщенная ИМ. Проведенный анализ показал, что степень атрибутивности модели должна дифференцироваться в зависимости от типа производства: от минимальной в единичном строительстве до максимальной в массовом.

Критическим этапом, определяющим качество цифрового двойника, является строительный контроль. Именно в этот период происходит верификация проектных решений и фиксация фактических параметров объекта. Интеграция результатов строительного контроля в процесс информационного моделирования позволяет не только повысить качество и прозрачность строительства, но и обеспечить информационную преемственность на всем протяжении жизненного цикла объекта капитального строительства. Развитие управления ЖЦ ОКС будет связано с углубленным применением ИИ, автоматизации и роботизации, для которых структурированные атрибутивные данные служат основой.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку методик оценки зрелости атрибутивных данных и интеграции результатов строительного контроля с моделями машинного обучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Adamtseva L.A.* Lifecycle management of integrated territorial development projects based on organizational and technological solutions // *Real Estate: Economics, Management*. 2025. № 4. 32–39. EDN HGHDDQ.
2. *Исупов Н.С., Карманова М.М., Придвижкин С.В., Фомин Н.И.* Возможности управления жизненным циклом объекта строительства с применением ТИМ // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023. Т. 23. № 1. С. 48–56. DOI: 10.14529/build230106. EDN JQICWG.
3. *Шилова Л.А.* Информационная поддержка управления объектами жизнеобеспечения с учетом критериев инженерной и функциональной устойчивости на случай чрезвычайной ситуации // *Информа-*

- ционные ресурсы России. 2014. № 6 (142). С. 24–27. EDN TBRWKF.
4. *Ginzburg A., Shilov L., Shilova L.* The methodology of storing the information model of building structures at various stages of the life cycle // *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019*. 2020. P. 012156. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012156. EDN JNGNOD.
5. *Нечаев А.А.* Интероперабельность систем информационного моделирования зданий // *Шаг в науку*. 2023. № 4. С. 70–78. EDN LLGZYS.
6. *Филатов В.В., Пестрикова А.Д., Адамцевич Л.А.* Отечественный опыт развития технологий информационного моделирования // *Промышленное*

и гражданское строительство. 2023. № 9. С. 80–87. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.80-87. EDN RWKEGQ.

7. Бовтеев С.В., Петелин М.Е. Требования к разработке 3D-модели и календарно-сетевого графика для оптимизации процесса 4D-моделирования // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 226–229. EDN OUEFFF.

8. Крюков К.М., Шаповалов А.В. Использование технологии цифровых двойников в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 517–525. EDN SVHWWZ.

9. Adamtsevich L. Industry 4.0 technologies for ensuring the functionality of urban infrastructure socially significant elements : a review // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 3–22. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_1. EDN WLBPSI.

10. Мошкалёв Д.С. Практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1513–1527. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1513-1527. EDN WHYDYF.

11. Федосов С.В., Опарина Л.А., Федосеев В.Н. Цифровой проект организации строительства: по-

нятие, современные требования, программное обеспечение // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 2. С. 143–149. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-143-149. EDN IULEKX.

12. Якушев Н.М., Иванов Д.А., Симаков Н.К., Кисляков М.А. Инновации в жизненном цикле строительства посредством интеграции BIM/ГИС // Строительство и техногенная безопасность. 2024. № 33 (85). С. 23–29. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-33-23-29. EDN UGGEHN.

13. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH.

14. Суржиков Р.И. Внедрение BIM технологий в управление жилым комплексом // E-Scio. 2019. № 4 (31). С. 250–257. EDN JPYBNF.

15. Ларионов А.Н., Соловьев В.В., Морозов А.А. Формирование модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 91–101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT.

Поступила в редакцию 20 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 28 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Виктор Сергеевич Евстратов — преподаватель; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4837-7695, РИНЦ ID: 895643, Scopus: 57197806238, ORCID: 0000-0002-7794-3897; EvstratovVS@mgsu.ru;

Алексей Петрович Стрелков — магистрант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; EvstratovVS@mgsu.ru;

Евгения Александровна Гинзбург — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; EvstratovVS@mgsu.ru;

Егор Максимович Железнов — магистрант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; EvstratovVS@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Евстратов В.С. — научное руководство, общая концепция исследования.

Стрелков А.П. — написание исходного текста, подбор литературы.

Гинзбург Е.А. — доработка текста, итоговые выводы.

Железнов Е.М. — доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The life cycle management of a capital construction project (CCP LC) is a comprehensive process covering all stages of the project's existence — from the initial concept through to its decommissioning. The term “cap-

ital construction project” applies to projects at all stages of the life cycle, except for the operational stage, where the term “property” is used [1]. At the same time, the set of methods and tools for managing capital construction projects changes dynamically as the project progresses through the stages of its life cycle [2–4].

The foundation is building information modelling (BIM in international literature, or TIM in Russian literature) [5–7]. This approach involves creating a detailed digital 3D model of the project during the design phase, which subsequently serves as a single source of data throughout its entire life cycle. However, despite the widespread use of building information modelling technologies during the design phase, their potential in subsequent stages — particularly during construction supervision — is not fully realized.

The aim of the study is to justify the need to integrate construction supervision into a unified digital environment based on an information model (IM) as a mechanism for data verification and the creation of a reliable digital twin of the facility. To achieve this, the following steps should be taken:

- to systematize information on the application of information modelling technologies at the various stages of the life cycle;
- identify how the level of detail (attribution) of the model depends on the type of construction activity;
- demonstrate the key role of construction supervision as a mechanism for verifying and populating the model during the construction phase, in order to create a reliable digital twin of the construction project.

MATERIALS AND METHODS

An analytical review was conducted to synthesise information from scientific and technical literature, regulatory documents and industry publications concerning the management of the life cycle of a capital construction project, information modelling and the use of related technologies. The following approaches and tools were examined:

- information modelling (BIM/TIM) — a fundamental method for creating and maintaining a digital description of a facility;
- common data environments (CDE) — collaborative platforms (such as Autodesk Construction Cloud, Trimble Connect, etc.) that provide a single repository for up-to-date information;

- digital twins — dynamic virtual copies of a facility, updated in real time with data from Internet of Things (IoT) sensors [8, 9];

- management systems — automated property management systems (CAFM), enterprise resource planning (ERP) systems, and supply chain management (SCM) systems;

- analytical methods, such as life-cycle cost (LCC) analysis, risk management (FMEA, SWOT analysis), environmental certification (LEED, BREEAM), as well as cutting-edge technologies — blockchain to ensure the immutability of records, artificial intelligence (AI) to optimize decisions, and geographic information systems (GIS) for infrastructure projects [10–12].

Particular attention is paid to the concept of the attribution of an information model, i.e. the ability of the model's elements to contain not only geometric but also semantic data (physical, technical, economic and operational characteristics). In order to analyze the impact of the type of construction on the required level of attribution, three categories have been identified: one-off (unique structures), standardized (standardized buildings) and mass (large residential estates, networked facilities) construction.

RESEARCH RESULTS

Information model at the various stages of the CCP life cycle

The analysis carried out has determined the content of information modelling at the main stages of the life cycle (Table).

The management of the CCP life cycle is structured in a similar way in accordance with standardized phases, utilizing specialized systems, including common data environments (CDE) such as Autodesk Construction Cloud or Trimble Connect, computerized facility management (CAFM) systems, IBM Maximo or ESTRON, and enterprise resource planning (ERP) systems, such as SAP or 1C:ERP, which play a key role in managing finances, material resources, logistics and timelines.

The application of information modelling at the stages of the life cycle of the CCP

Life-cycle stage	Target function	Management entities	Content	Primary users
Feasibility study and design stage	Verification of space-planning and structural solutions, early-stage clash detection, and optimization of the estimated cost	Design organizations, chief project engineer, BIM coordinators	Geometric parameters, material specifications, utility systems, time-related parameters (4D), and cost parameters (5D)	Review authorities, technical client, and contractors
Construction	Updating design solutions in accordance with the work actually performed and generating as-built documentation in a digital environment	General contractor, construction supervision, and surveying service	Actual geometric parameters, material passports and certificates, concealed-work inspection certificates, and photographic records of defects	Operating organizations and technical inventory services

End of the Table

Life-cycle stage	Target function	Management entities	Content	Primary users
Reconstruction	Assessment of physical deterioration	Assessment of physical deterioration and planning of dismantling works	Owners	Current configuration of load-bearing elements
Disposal	Planning of dismantling works and sorting of materials for recycling	Sorting of materials for recycling	Owners, specialized demolition contractors, and environmental control authorities	Material data and concealed utilities

Digital twins [8, 9], which are dynamic virtual copies of a facility updated in real time with data from IoT sensors, help to improve the efficiency of the management process during the operational phase.

Supply chain management (SCM) minimizes downtime and the risk of material shortages at all stages, whilst LCC enables the assessment not only of the initial investment but also of all future operating, maintenance and decommissioning costs, ensuring that decisions are economically sound. Risk management methods, such as FMEA or SWOT analysis, are applied in parallel, alongside insurance, to minimize potential threats to the project [10].

Modern life-cycle management of capital construction projects also places great emphasis on sustainable development, where environmental standards such as

LEED and BREEAM set requirements for energy efficiency, the use of environmentally friendly materials and the minimization of waste throughout the entire life cycle. To enhance the transparency of processes, block-chain technologies are increasingly being used to ensure the immutability of records in contracts, supply chains and documentation [11].

Automation and AI are permeating every aspect of a construction project's life cycle: from optimizing design solutions and forecasting timelines to managing robotic equipment on the construction site. Geoinformation systems are being integrated to manage infrastructure projects [12].

Thus, effective management of a construction project's lifecycle is achieved through the integration of key

Свойства	
Свойство	Значение
Вид остекления	Двойное остекление
Класс по воздухо- и водопроницаемости	A
Класс по общему коэффициенту	3
Класс по приведенному сопротивлению	C
Класс по звукоизоляции изделия	C
Класс по сопротивлению	C
Конструктивное исполнение изделия	Распашное
Масса	200,00 кг
Материал подоконной доски	-
Материал рамочных элементов	ПВХ
Наименование	Окно двустворчатое полутрапециевидное
Обозначение	Правый полутрапециевидный проем
Примечание	
Размер	3200x1800
Сопротивление теплопередаче	1,25
Строительный модуль	100,00 мм

Fig. 1. Example of attributes for a translucent building envelope

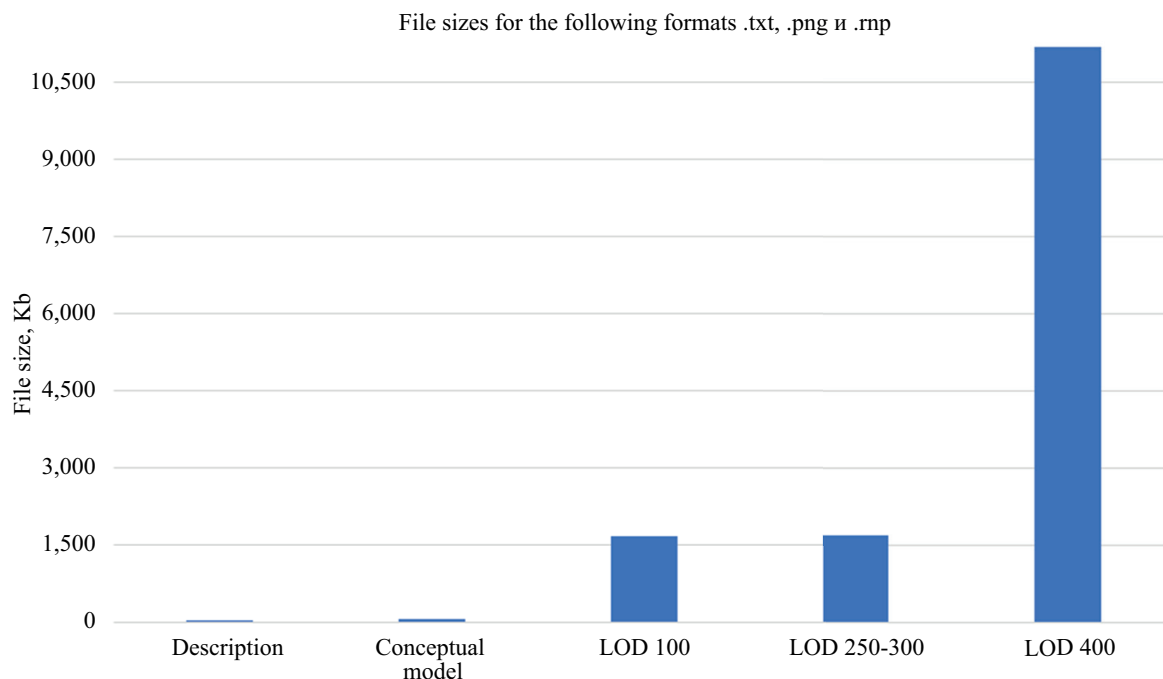


Fig. 2. Graph showing changes in file size as the level of detail in the information model increases

approaches and technologies such as information modeling, the use of data from IoT sensors and digital twins, the application of advanced management systems (ERP, CAFM) and analytics (LCC), as well as the implementation of sustainable development principles and automation. The main focus is on creating a unified digital environment where all these technologies work in harmony, ensuring end-to-end transparency, efficiency and control from concept to decommissioning [13].

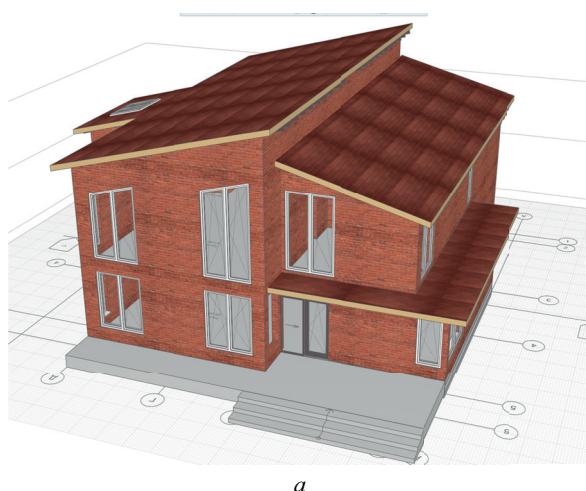
The relationship between the attributiveness of the information model and the type of construction production

By “attribution”, we mean the property of objects in an information model (BIM model) to contain not only geometric information (shape, dimensions, spatial

position), but also semantically rich data (attributes) that describe their physical, technical, economic and operational characteristics. Fig. 1 shows an example of how to populate attributive information for a translucent building envelope.

The level of detail and the richness of the attribute information in a 3D building model are directly dependent on the standardization and industrialization of construction. Attributiveness refers not merely to the geometry of an object, but to a set of parameters and data associated with each element of the model, such as material, manufacturer, service life, etc. The value of this information is directly determined by the type of production [14, 15].

As the level of detail increases, the digital information model (BIM) is populated with various data, which predictably leads to an increase in the BIM file size. As



a

Свойства	
Свойство	Значение
Армирование	Две сетки 300х300 с лагушками
Индекс изоляции воздушного шума	53,00
КСИ	<COM> ULK
Материал	Железобетон
МССК	Эл 30 10 40
Нагрузки	Постоянная нагрузка от здания
Наименование	Железобетонная фундаментная плита
Обозначение	Фундаментная плита-Ф1
Площадь	207,70 м²
Примечание	Фундаментная плита, предназначенная для поддержания нагрузки от здания
Тип	Фундаментная плита
Толщина	200,00
Уровень	Уровень низа: -0,500; Уровень верха: +0,000

b

Fig. 3. BIM at LOD 400 (a); an example of foundation slab attributes in a BIM model at LOD 400 (b)

an example, a graph showing the change in file size as the model is enriched with information, from the task description to a model at LOD 400, is provided (Fig. 2); Fig. 3, *a* shows a 3D model of a cottage at Level of Detail (LOD) 400, where attributes have been added to each element of the model (Fig. 3, *b*).

It is worth noting that in one-off production (unique structures), priority is given to the visualization of complex geometry and collision detection. In such projects, the use of attributes is limited, and the information is generally not standardized and is rarely used after the construction phase.

Mass production (standardized residential buildings, warehouses) is characterized by a high and mandatory level of attribute-based modelling. Libraries of elements with pre-filled attributes are created, and the model serves as the basis for the automatic generation of specifications, cost estimates and material orders.

In mass production (housing estates, chain developments), the level of attribute detail reaches its maximum. Each element is assigned a unique identifier linking information on production, installation and maintenance. The model becomes a digital twin, essential for the effective management of identical facilities.

Construction supervision as a key stage in model verification

The analysis carried out revealed that it is precisely during the construction phase that a critical transformation takes place from the design model to the as-built model, where, without high-quality construction supervision ensuring the incorporation of actual parameters (results of surveying, data on materials used, certificates of concealed works, photographic documentation of defects), the information model cannot serve as a basis for the subsequent operational phase.

Thus, the use of an information model in construction supervision enables:

- deviations to be identified at an early stage and costly rework to be prevented;
- information on defects to be collated for the analysis of typical problems;
- synchronize information amongst all construction stakeholders within a shared data environment;
- ensure transparency and objectivity in supervision.

As a result, construction supervision ceases to be an isolated oversight function and becomes a mechanism for verifying and populating the information model, which is essential for creating a reliable digital twin.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The results obtained confirm that modern management of the life cycle of construction and installation works is evolving dynamically from a set of disparate processes towards a holistic technological ecosystem, in which information management (IM) plays a key role; the degree of attribute-based data in IM must correspond to the type of production and the objectives of the rel-

evant stage of the life cycle. The identified relationship is directly consistent with global trends, which support the view that, in serial and mass construction, data standardization and high levels of attribute detail are becoming a prerequisite for automation and robotization [13].

The construction supervision stage takes on particular significance. Often, the literature focuses primarily on design and operation, whilst the intermediate phase of construction is treated as a “black box”. The authors’ research shows that it is precisely during construction supervision that the foundations are laid for the future development of the information model and its transition to a digital twin. Furthermore, the use of the IM in construction supervision makes it possible not only to improve the quality of work but also to ensure information continuity between the stages of the life cycle.

The integration of construction supervision into a common digital environment (CDE) opens up opportunities for automated comparison of “as designed” and “as built” (for example, based on laser scanning data); predictive risk analysis based on accumulated data on defects; and the creation of digital as-built documentation, ready for handover to the operational phase.

Digital twins enable real-time monitoring of an asset’s condition and the prediction of failures. Blockchain ensures the immutability of records relating to the quality and origin of materials. Artificial intelligence is capable of analyzing large sets of attribute data to optimize design and management decisions. However, the implementation of these technologies requires a high level of standardization and attribute-richness in the information model, which also underscores the need for high-quality construction supervision.

Based on the research conducted, the following conclusions can be drawn.

Effective management of the life cycle of building complexes requires the creation of a unified digital environment, the core of which is a semantically rich information model. The analysis carried out has shown that the degree of attribute-richness of the model should vary depending on the type of construction: from minimal in individual construction to maximal in mass construction.

Construction supervision is a critical stage that determines the quality of the digital twin. It is during this period that design solutions are verified and the actual parameters of the facility are recorded. Integrating the results of construction monitoring into the information modelling process not only improves the quality and transparency of construction, but also ensures information continuity throughout the entire life cycle of a capital construction project. The development of capital construction project lifecycle management will involve the in-depth application of AI, automation and robotization, for which structured attribute data serves as the foundation.

The authors’ further research will focus on developing methodologies for assessing the maturity of attribute data and integrating the results of construction monitoring with machine learning models.

REFERENCES

1. Adamtsevich L.A. Lifecycle management of integrated territorial development projects based on organizational and technological solutions. *Real Estate: Economics, Management*. 2025; 4:32-39. EDN HGHDDQ.
2. Isupov N.S., Karmanova M.M., Pridvzhkin S.V., Fomin N.I. The possibilities of managing the life cycle of a construction object using TIM. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2023; 23(1):48-56. DOI: 10.14529/build230106. EDN JQICWG. (rus.).
3. Shilova L. Information support of life support facilities with criteria of engineering and functional stability in emergency situation. *Information Resources of Russia*. 2014; 6(142):24-27. EDN TBRWKF. (rus.).
4. Ginzburg A., Shilov L., Shilova L. The methodology of storing the information model of building structures at various stages of the life cycle. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019*. 2020; 012156. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012156. EDN JNGNOD.
5. Nechaev A.A. Interoperability of building information modeling systems. *Step to Science*. 2023; 4:70-78. EDN LLGZYS. (rus.).
6. Filatov V.V., Pestrikova A.D., Adamtsevich L.A. Domestic experience in the development of information modeling technologies. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 9:80-87. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.80-87. EDN RWKEGQ. (rus.).
7. Bovteev S.V., Petelin M.E. Requirements for 3D model and schedule development to optimize the 4D modeling process. *Innovations & Investments*. 2023; 10:226-229. EDN OUEFFF. (rus.).
8. Kryukov K.M., Shapovalov A.V. The use of digital twin technology in construction. *Engineering journal of Don*. 2022; 5(89):517-525. EDN SVIHWZ. (rus.).
9. Adamtsevich L. Industry 4.0 technologies for ensuring the functionality of urban infrastructure socially significant elements : a review. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 3-22. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_1. EDN WLBPSI.
10. Moshkalev D.S. Practical tools of an integrated construction cost management system. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1513-1527. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1513-1527. EDN WHYDYF. (rus.).
11. Fedosov S.V., Oparina L.A., Fedoseev V.N. Digital project of construction organization: concept, definition, modern requirements, software. *Academia. Architecture and Construction*. 2024; 2:143-149. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-143-149. EDN IULEKX. (rus.).
12. Yakushev N.M., Ivanov D.A., Simakov N.K., Kislyakov M.A. Innovation in the construction lifecycle through BIM/GIS integration. *Construction and Industrial Safety*. 2024; 33(85):23-29. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-33-23-29. EDN UGGEH. (rus.).
13. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(2): 270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH. (rus.).
14. Surzhikov R.I. Implementation of BIM technologies in the management of a residential complex. *E-Scio*. 2019; 4(31):250-257. EDN JPYBNF. (rus.).
15. Larionov A.N., Solovov V.V., Morozov A.A. Development of a capital expenditure model in the context of construction digitalization. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(1):91-101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT. (rus.).

Received April 20, 2026.

Adopted in revised form on April 28, 2026.

Approved for publication on May 12, 2026.

BIONOTES: Victor S. Evstratov — lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4837-7695, ID RSCI: 895643, Scopus: 57197806238, ORCID: 0000-0002-7794-3897; EvstratovVS@mgsu.ru;

Alexey P. Strelkov — master's student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; EvstratovVS@mgsu.ru;

Evgeniya A. Ginzburg — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; EvstratovVS@mgsu.ru;

Egor M. Zhelezov — master's student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; EvstratovVS@mgsu.ru.

Author contributions:

Victor S. Evstratov — scientific supervision, general study concept.

Alexey P. Strelkov — writing the original text, selecting literature.

Evgeniya A. Ginzburg — text revision, final conclusions.

Egor M. Zhelezov — text revision, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.

АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721.01

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.9

Значимость художественно-эстетического аспекта оформления подземных пространств

Валерия Вячеславовна Шеин, Мелания Романовна Древаль

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуется роль подземных коммуникативных пространств (пешеходных переходов, станций метро) в формировании визуально-эстетической и социокультурной среды современного города. Актуальность работы обусловлена необходимостью трансформации утилитарных объектов в многофункциональные элементы городского ландшафта, влияющие на идентичность места и качество жизни горожан.

Материалы и методы. В основе исследования лежит комплекс методов: визуальный анализ оформления объектов по категориям (колористика, сюжет, фактура), гипотетико-дедуктивный метод, социологический опрос среди профессионального сообщества и жителей, фотофиксация и графическое моделирование. Эмпирическая база включает case studies объектов в городах России (Екатеринбург, Ростов-на-Дону), Европы (Нидерланды, Бельгия) и США.

Результаты. На основе значимости объекта в городской ткани предложена типология: доминирующие, формирующие каркас и периферийные объекты. Для каждого типа разработаны подходы к реновации — от экономически эффективных до комплексной реконструкции. Основным результатом являются четыре концептуальные модели художественно-эстетического преобразования пространств: миф/место; пространство — арт-объект; орнаментальная для протяженных пространств; бюджетная модель колористического членения.

Выводы. Доказано, что художественное оформление подземных переходов трансформирует их из сугубо функциональных в значимые элементы городской среды, повышая комфорт и безопасность. Предложенные универсальные модели позволяют системно подходить к интеграции искусства в урбанизированное пространство с учетом локального контекста, исторической значимости и бюджетных ограничений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура подземных пространств, подземный переход, станция метро, пешеходные пути, эстетика подземных пространств, архитектурная реконструкция подземных пространств

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шеин В.В., Древаль М.Р. Значимость художественно-эстетического аспекта оформления подземных пространств // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.9

Автор, ответственный за переписку: Мелания Романовна Древаль, melanidreval@yandex.ru.

The significance of the artistic and aesthetic aspect in the design of underground spaces

Valeriia V. Shein, Melani R. Dreval

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

ABSTRACT

Introduction. The paper investigates the role of underground communication spaces (pedestrian crossings, metro stations) in shaping the visual, aesthetic, and socio-cultural environment of modern cities. The research is driven by the need to transform utilitarian infrastructure into multifunctional elements of the urban landscape that enhance place identity, emotional well-being, and the overall quality of life for inhabitants.

Materials and methods. The study employs a multifaceted methodological approach, including visual analysis of spaces based on categories like color scheme, narrative, and materials; a hypothetical-deductive method; sociological surveys tar-

getting both professionals and the general public; photofixation; and graphical modeling. The empirical basis comprises case studies from cities in Russia (Yekaterinburg, Rostov-on-Don), Europe (the Netherlands, Belgium), and the USA.

Results. A typology of objects is proposed based on their urban significance: dominant ("Image of the City"); structurally Significant; peripheral. For each type, tailored renewal strategies are developed, ranging from cost-effective cosmetic enhancements to comprehensive reconstruction. The core outcome is the formulation of four universal conceptual models for aesthetic transformation: 1) "Genius Loci" (myth/place); 2) "Space – Art Object"; 3) Ornamental for extended spaces; and 4) Cost-effective color division for peripheral areas.

Conclusions. The study confirms that artistic design transforms underground passages from purely functional conduits into significant elements of the urban fabric, improving comfort and perceived safety. The proposed conceptual models provide a systematic framework for integrating art into urban infrastructure, effectively considering local context, historical significance, and budgetary constraints. This approach allows for the rational and aesthetically valuable organization of urban underground spaces, systematizing the visual image of the anthropogenic environment.

KEYWORDS: architecture of underground spaces, underground passage, metro station, aesthetics of underground spaces, architectural reconstruction of underground spaces, urban design, cultural heritage

Acknowledgements. The authors sincerely thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions that helped improve the quality of the article.

FOR CITATION: Shein V.V., Dreval M.R. The significance of the artistic and aesthetic aspect in the design of underground spaces. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.9

Corresponding author: Melani R. Dreval, melanidreval@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Искусство — это удивительный способ диалога людей разных эпох и поколений, заимствования опыта. Иначе говоря, дань уважения традициям, но и новаторство [1]. Художественное выражение, вписанное в городскую среду, давно перестало быть исключительно декоративным элементом. Оно выполняет важные социальные и культурные функции, формируя идентичность места [2] и влияя на эмоциональное состояние и в итоге на качество жизни в урбанизированной среде [3].

С точки зрения урбанистики общественные пространства становятся важнейшим элементом в формировании визуальной идентичности города [4]. Они создают особую атмосферу, которая притягивает как гостей, так и жителей, создавая эмоциональный ландшафт и способствует становлению визуальной и психологической социокультурной среды [5]. Именно целостный подход к оформлению пространств, или наоборот, акцентирование внимания на более мелких деталях, в контексте города [6], может стать композиционной доминантой и, как следствие, центром притяжения общественности [7] в соответствии с принципами организации жизнеспособных городских пространств [8].

На основе опыта теорий проектирования в современном архитектурном подходе выведено новое отношение к облику города и взято на вооружение многофункциональное использование транспортно-пешеходных путей, узлов и городских территорий. Таким образом, этим объектам отводится ключевая роль в структуре города [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования использованы следующие методы:

- визуальный анализ — изучение оформления подземных коммуникационных пространств в соот-

ветствии с категориями (колористическая схема, возраст, особенности сюжета, а также их роль в формировании визуального облика города);

- гипотетико-дедуктивный метод познания;
- социологический опрос;
- фотофиксация;
- графическая часть.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подземные коммуникативные пространства являются важным функциональным объектом и неотъемлемой частью инфраструктуры городского пространства¹. Как и любой другой компонент целого, т.е. современного города, подземные переходы могут использоваться не только как утилитарный элемент, но и как своеобразная арт-галерея, отражающая культурный код региона [10].

Цель исследования — проанализировать значимость утилитарных коммуникационных подземных пространств в структуре города, в результате анализа выявить оптимальные, концептуальные и универсальные подходы в оформлении подземных коммуникативных пространств с учетом художественно-эстетического и архитектурного аспекта при применении категорий (колористическая схема, фактура и материалы, особенности сюжета, а также их роль в формировании визуального облика города).

Задачи исследования:

- проанализировать существующие подземные пространства в структуре городов Европы, России, США;
- выявить стилевые и сюжетные направления концепций оформления пешеходных переходов в структуре города;

¹ Материалы по стратегиям градостроительного развития : Администрация г. Ростова-на-Дону. Ростов-на-Дону : Муниципальная пресса, 2023.



а



b

Рис. 1. Подземный пешеходный переход в Екатеринбурге, Россия (а); в Зволле, Оверэйсел, Нидерланды (b)

• предложить классификацию существующих подземных пространств по расположению в структуре города по концептуально-семиотическому ядру;

• предложить концептуальные модели преобразования, оптимизирующие взаимодействие визуально-эстетической и функциональной компоненты подземных коммуникационных пространств.

В зависимости от статуса и функции объекта в ткани города может быть использован разный тип обновления пространства.

Объекты типизируются:

- объект повышенной значимости («лицо города»);
- объект значимый в контексте презентации урбанизированной структуры;
- объект периферийный.

Соответственно в зависимости от типа значимости предлагаются следующие пути реализации:

• использование экономически рациональных материалов и способов: оштукатуривание, окраска (создание эстетически ценного визуального образа реконструируемых пространств путем косметического ремонта вертикальных конструкций, сводов, покрытия);

- реконструкция.

Объект значимый рассматривается в контексте концепции «миф/место». Концепция заключается в связи расположения места и его историко-культурного контекста. Еще один важный ракурс понимания места — наличие адресата, личности, которая переживает окружение, аккумулирует смысловые и эмоциональные послы и способна выразить образ окружения в своем авторском творчестве.

Примеры оформления утилитарных объектов пешеходного назначения и транспортного назначения (пешеходные переходы, станции метро и др.) в зависимости от типизации объекта.

Россия, г. Екатеринбург

В данном примере используется прием оформления пространства с идеей «миф и место», так как объект является значимым в контексте урбанизированной структуры города. Идейно объект привязан к своему расположению, находится поблизости от центрального парка культуры и отдыха им. В.В. Маяковского, оформление содержит элементы

художественного направления «футуризм», что отсылает к творчеству поэта (рис. 1, а).

Нидерланды, Оверэйсел, Зволле, Туннель времени

В этом примере используется принцип орнаментальности в оформлении пространства, который создает дополнительную динамику, при этом колористическое решение сдержанное, так как объект является связующим, а не протяженным. В выведенной модели предлагается более контрастное и насыщенное цветовое решение (рис. 1, b).

Бельгия, Брюссель, станция метро «Граф де Фландр»

Применяется принцип наименьших затрат при наибольшей художественной составляющей оформления объекта, т.е. стратегия экономической эффективности. Эта методология проистекает из глубокой философской концепции среды, где минимальность финансовых вложений гармонично сливается с визуальной выразительностью конечного результата.

«16 икаров» состоит из шестнадцати фигур, свисающих с потолка, расположенных на разных уровнях в направлении планетария. «Тела, руки и ноги имеют несколько положений, но все они, несомненно, вызывают движение вперед, силу притяжения потока к концентрации планет, который притягивает как новый, неизвестный мир, полный света и очарования», — повествует автор (рис. 2).

Россия, г. Ростов-на-Дону

Ростов-на-Дону насыщен оформленными утилитарными объектами с применением различных приемов с учетом форм, протяженности, места и его истории. Мозаичные панно, расположенные в пере-

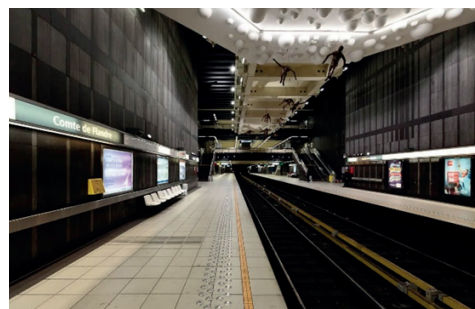


Рис. 2. Станция метро «Граф Фландрский» в Брюсселе, Бельгия

ходах г. Ростов-на-Дону, — уникальное в эстетическом контексте явление. Это исключительное сочетание оформления объекта и наделения его не только утилитарной составляющей, но и художественно-эстетической ценностью.

Сюжеты транслируют локальную идентичность, они не только повествуют нам о мечтах и фантазиях советского гражданина о покорении космоса, но также рассказывают и показывают исторические события прошлого, зарисовки повседневности и, самое важное, региональную самобытность [11], отражающую характерные особенности архитектурно-ландшафтной организации городов региона [12]. Эти проекты не только улучшают визуальное восприятие пространства, но и создают точки притяжения для горожан и туристов.

Для визуального рассмотрения прилагаются фотографии мозаичных панно с подробным описанием по следующим категориям.

Серия панно «От роддома до выпускного»

Сюжетная линия — цикл жизни советского гражданина, что не может не трогать зрителя [12]. Серия состоит из пяти панно, которые иллюстрируют определенные этапы жизни человека — его становление как личности [13, 14]. Композиционно содержит ряд ценных особенностей, которые заставляют зрителя взаимодействовать с произведением, таким образом происходит феномен постмодернистского слияния в контексте современных подходов к сохранению культурного наследия [15]. На первом изображении композиционным центром является скопление людей, также возникает акцентный психологический прием повествования сюжета, вследствие которого внимание зрителя приковывается к сцене коммуникации людей,

показательный момент — женская фигура в цветочном платье, которая «дает кулачок» новоиспеченному брату.

Колористическое решение выдержано в нейтральных тонах, подходящее для ситуации. Семиотически интересно акцентирование зеленым цветом ковровой дорожки к дверям, из которых выносят новорожденных — таким образом создается прямая ассоциация новой жизни (зеленый цвет). Состояние панно оценивается как хорошо сохранившееся, однако требуется незначительное восстановление мозаичных деталей, в таких случаях применяется метод реставрации (рис. 3, а). Серия панно «От роддома до выпускного» показана на рис. 3.

Композиция второго изображения также привлекает внимание, хочется рассматривать, чем компании детей занимаются, обильное количество деталей, колористическая схема так же достоверно выдержана в соответствии с зимним пейзажем. Произведение интересно с исторической точки зрения, запечатлевается типичная советская застройка второй половины XX в. Она со временем канет в небытие, точно так же, как и следующее представленное изображение, что придает работе экзистенциальный контекст. Настроение панно вызывает ностальгию, связанную не только с духом времени, но и с универсальными воспоминаниями о детстве. Состояние панно требует реставрационных работ (рис. 3, б).

Третье панно, сюжетно посвященное принятию в пионеры, вызывает ностальгические ассоциации с эпохой СССР. Работа выделяется тщательной проработкой деталей и удачным цветовым решением, что делает ее одной из наиболее выразительных в се-

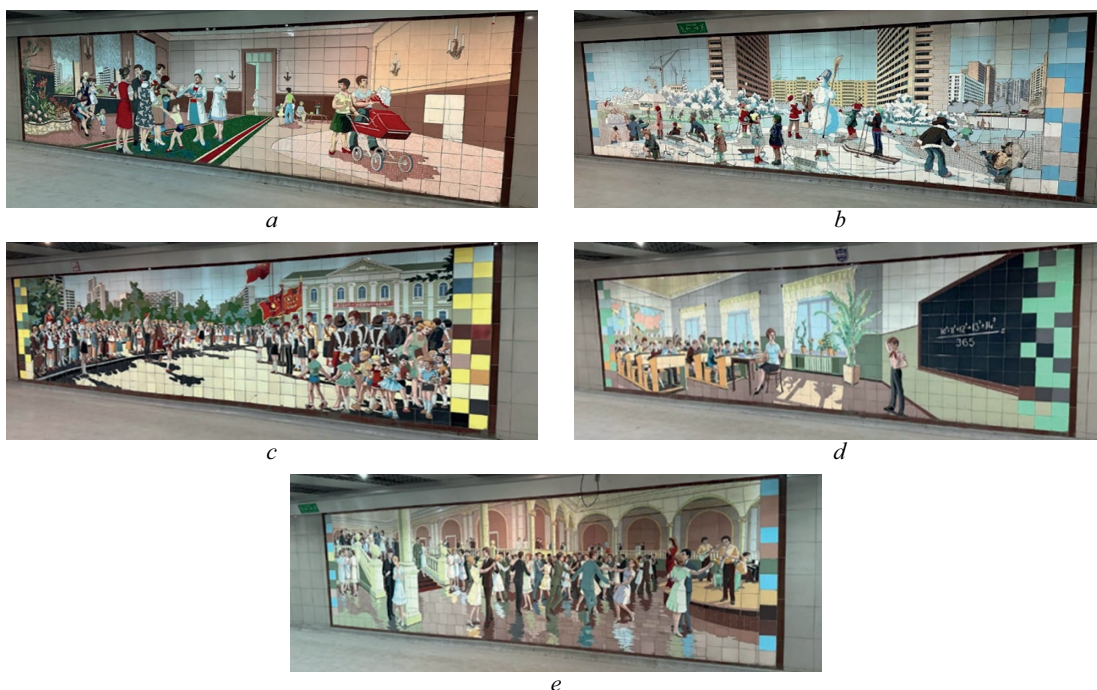


Рис. 3. Серия панно «От роддома до выпускного бала»



Рис. 4. Панно «Подвиг батареи Оганова» в боях с немцами

рии. Состояние панно оценивается как хорошо сохранившееся (рис. 3, с).

Четвертое изображение композиционно выделяется посредством ввода мощного акцента в виде школьной доски, а именно уравнием, которое не попробовал посчитать лишь ленивый местный житель. Сдержанная колористическая гамма вызывает ассоциации со школьной тематикой, что усиливает психологическое воздействие работы. Состояние панно так же характеризуется как хорошо сохранившееся (рис. 3, d).

Завершающая работа серии, посвященная выпускному балу, подчеркивает цикличность жизни. Колористическое решение этой работы — одно из наиболее удачных в серии, что подчеркивает мастерство авторов в передаче эмоциональной атмосферы. Композиция классическая, присутствует глубина пространства на картинной плоскости, теплая гамма зала торжеств олицетворяет успешно пройденный текущий этап жизни и настраивает на положительный, светлый образ будущего. Фигуры находятся в радостном, волнительном взаимодействии.

Серия панно «От роддома до выпускного» является исторически, художественно-эстетически ценным и целостным произведением монументально-декоративного искусства. Она сочетает в себе глубокую эмоциональную вовлеченность, тщательную детализацию и семиотическую насыщенность, что делает ее важным объектом изучения в контексте культурного наследия (рис. 3, e).

Панно «Подвиг батареи Оганова» в боях с немцами

Данная композиция посвящена одному из ключевых событий в истории страны — Великой Отечественной войне [16]. Сюжет, вызывающий глубокий эмоциональный отклик, сочетает патриотическое настроение и ностальгическую тоску, что делает его близким для миллионов людей [17]. Исторический контекст передан четко и достоверно, подчеркивая значимость событий того времени [18].

Колористическое решение выдержано в холодных, усложненных тонах, соответствующих зимнему пейзажу и суровому духу военного времени. Это создает атмосферу напряженности и одновременно подчеркивает реалистичность изображения.

Однако композиция панно, выполненного во всю стену перехода, выглядит растянутой, что несколько рассеивает фокус внимания зрителя. Отсутствие четких акцентов и масштабность изображения затрудняют восприятие работы как единого целого. Несмотря

на растянутость композиции, благодаря этому зритель может полным образом погрузиться в атмосферу, воспроизводимую данным панно. Серия остается важным художественным и историческим объектом, передающим дух эпохи и эмоциональную глубину событий. Она служит напоминанием о героизме и трагедии прошлого, сохраняя память для будущих поколений. Для улучшения восприятия можно рассмотреть возможность добавления композиционных акцентов или разделения панно на смысловые блоки (рис. 4).

Панно исторической зарисовки «Флот, спускаемый в р. Термерник»

Композиция сюжетно посвящена важнейшему событию в истории Донского края, а именно строительству российской флотилии во время второго Азовского похода Петра I. Композиционно панно выполнено лаконично, разделено на основные части для отражения не только основного сюжета, но и казачьего быта. В данном панно ярко читается концепция «миф/место», так как сюжет является основополагающим для региона, в котором расположен.

Цветовое решение одно из самых удачных среди рассматриваемых, оно четко акцентирует внимание на основных сценах, также отвечает духу того времени и географическому определению сюжета. Панно является исторически важным объектом, показывающим локальный ход истории. Состояние в общей сложности удовлетворительное. Требуется незначительная реставрация (рис. 5, a).

Мозаичные панно в пешеходном переходе по адресу ул. Большая Садовая/пер. Университетский

Это единственная мозаика по указанному адресу, выделяющаяся на фоне остальных благодаря своему особому подходу к реализации изображения. Ее уникальное исполнение, создающее эффект объема за счет вдавленности в стену, привлекает внимание и добавляет работе выразительности. Хотя композиционно наличие лишь одной мозаики в переходе можно считать недостатком, с другой — это делает ее уникальной и запоминающейся. Возникает определенная плюральность в связи с композиционным решением оформления этого перехода.

Колористическое решение нейтральное, однако синие детали можно заменить на более гармоничный цвет, например зеленый, который противоположен используемым красным оттенкам по цветовому кругу. Это усилит композиционную целостность работы.



Рис. 5. Мозаичное панно: *a* — «Флот, спускаемый в р. Темерник»; *b* — на пешеходном переходе на пересечении Большой Садовой ул. и Университетского переулка

Состояние мозаики оценивается как довольно хорошее, что позволяет сохранить ее как яркий и необычный элемент городского пространства (рис. 5, *b*).

Отдельным достаточно важным аспектом является отражение культурной идентичности в рассматриваемом проекте. Здесь используются местные символы и мотивы, что подчеркивает уникальность. В общей сложности весь проект выполнен с абсолютно точным отражением культурного кода Ростова-на-Дону, жизни и грез советского гражданина.

Говоря о социальном воздействии оформления утилитарных объектов, следует сослаться на проведенные социологические опросы в ходе исследования, сделанные на разные целевые аудитории (профессиональное сообщество и обыватели) [19], где отмечается, что население чувствует потенциальную опасность в неоформленных и неосвещенных переходах, а профессиональное сообщество отмечает важность оформления утилитарных пространств и корректного выбора художественных приемов в зависимости от типизации пространства.

Предлагается четыре концептуальных и универсальных модели.

1. Модель значимого, эстетически ценного и цельного пространства с использованием концепции «миф и место», где за основу отвечает культурная и историческая составляющая для формирования пространства (рис. 6).

2. Модель «пространство – арт-объект» — значимый объект в структуре города, но оформление не привязано к истории места, выступает самостоятельной художественно-эстетической единицей, что соответствует концепции архитектуры как символа.

Эта модель выделяется как подход к проектированию подземного пространства. Универсальная взрывная схема формирования внутреннего пространства здесь неприменима, поскольку при таком подходе инновации рассматриваются в контексте конкретного объекта.

3. Модель протяженного пространства, использующая принцип орнаментальности с уточнением композиционной равнозначности технологий (окраса, панели и т.д.) и композиции, основанной на соотношении массы (рис. 7).

4. Модель для периферийных объектов с минимальными затратами при помощи применения колористического членения пространства с использованием простых и доступных (рис. 8).

Проектные предложения основываются на ранее предложенной идее оформления утилитарных объектов города. Основная цель — использование данного пространства как многофункционального, вписание его в городской «пейзаж» и создание комфортной городской среды. В зависимости от статуса и функции объекта в ткани города может быть использован разный тип обновления пространства с учетом типич-



Рис. 6. Взрыв-схема первой концептуальной модели (*a*); внутренняя часть первой концептуальной модели (*b*)

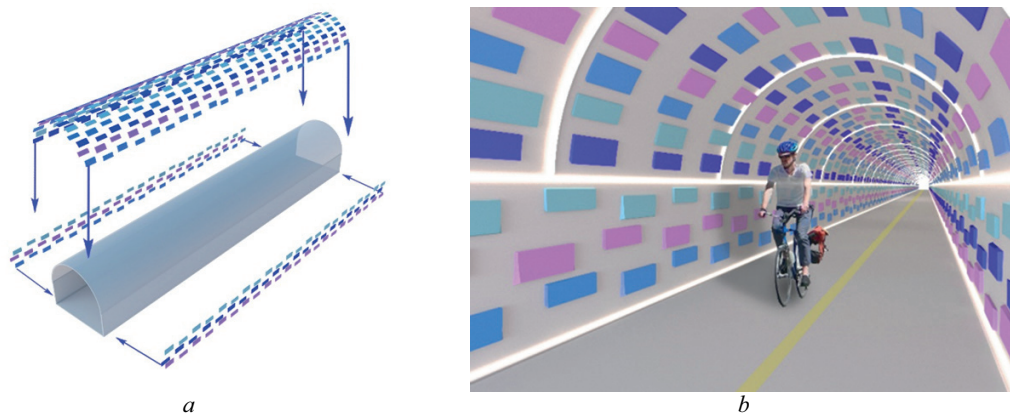


Рис. 7. Взрыв-схема третьей концептуальной модели (а); внутренняя часть третьей концептуальной модели (b)

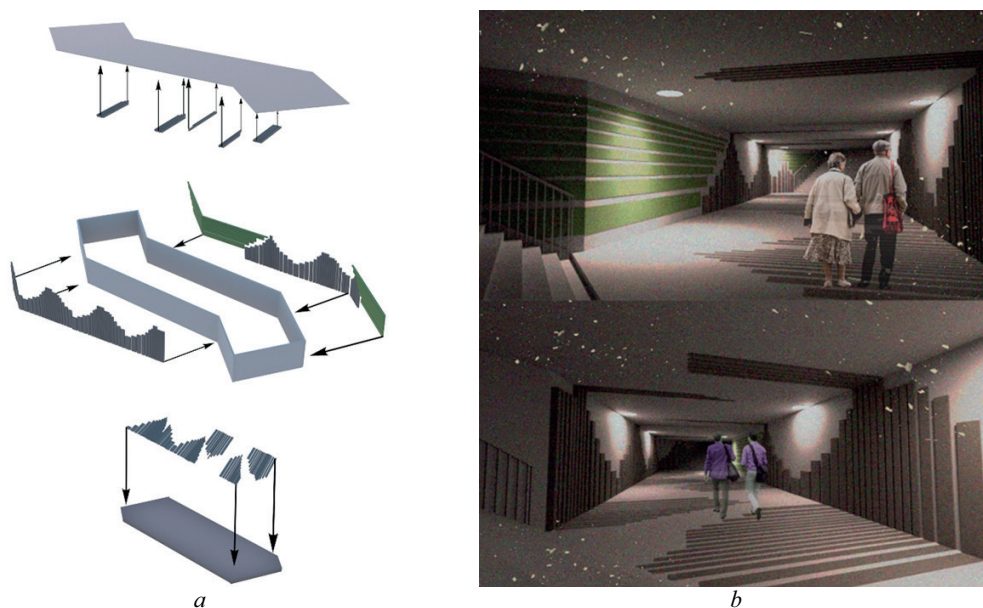


Рис. 8. Взрыв-схема четвертой концептуальной модели (а); внутренняя часть четвертой концептуальной модели (b)

зации объекта, которая предлагается в методологической части исследования.

1. На примере г. Ростова-на-Дону.

Проектные предложения включают новое общее колористическое предложение оформления подземных переходов и существующих мозаичных панно. При переосмыслении оформления важно учитывать световое акцентное оформление мозаик и цветовое окружение, которое будет также акцентировать внимание зрителя на панно и не конкурировать с ним. Так же цветовое решение следует сделать монохромным, в оттенках, соответствующих общей стилистике перехода, для лучшего психологического восприятия человеком и создания комфортной городской среды.

Рассматривая эстетическую и социальную значимость данных объектов, стоит отметить, что художественное оформление переходов превращает их из «невидимых» зон в значимые элементы городского ландшафта. Это способствует формированию эстетически ценной среды, что особенно важно в условиях плотной застройки и влияет на восприятие города.

Первое колористическое решение оформления основано на приеме акцентного выделения мозаичных панно. Вписывая их в «серую массу», внимание зрителя сразу захвачено, но притом окружающая среда не является агрессивной, а наоборот, располагающей к ознакомлению с панно (рис. 9, а).

Второе решение основано на приеме органичного вписания мозаичного панно в окружающую среду, таким образом осуществляется формирование композиционно целостного подземного пространства (рис. 9, b).

Третье решение представляет собой также акцентное выделение, но уже в общем оформлении. Более контрастное решение, которое поможет связать более естественные цветовые сочетания с универсальным и прагматичным общим колористическим решением (рис. 9, c).

2. На примере зарубежных подземных пешеходных переходов.

В европейском опыте организации подземных пространств достаточно редко практикуется ввод

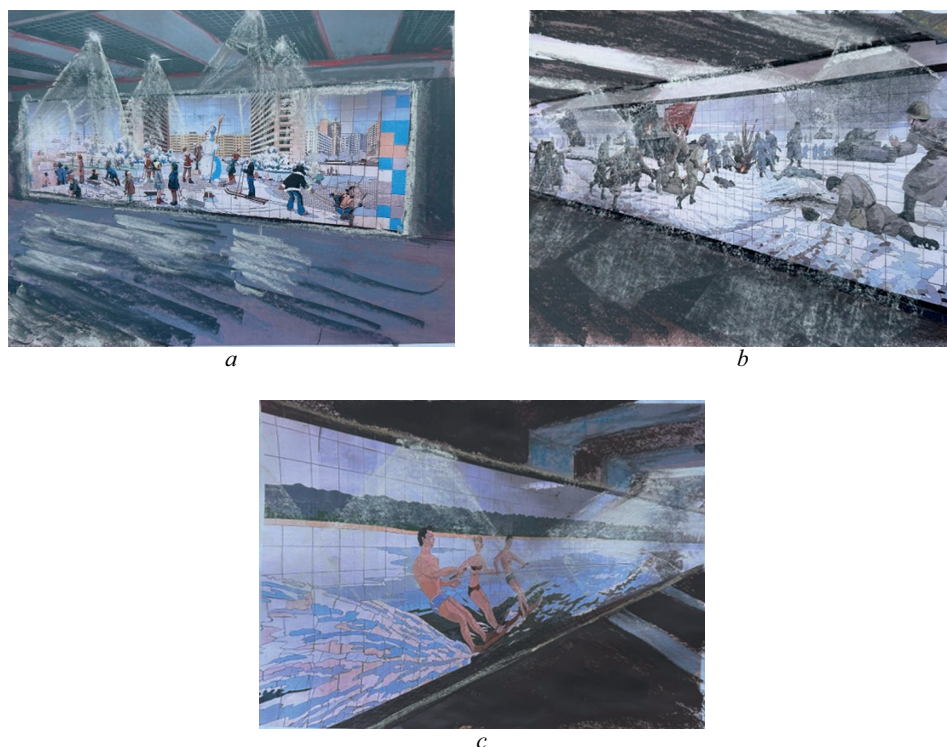


Рис. 9. Эскиз проектного предложения по г. Ростову-на-Дону

уникальных с точки зрения художественно-эстетических характеристик приемов оформления подземных пешеходных переходов, так как европейские урбанистические тренды предполагают скорее отказ от таких пространств путем выноса перехода на поверхность. Однако по ряду причин (регулирование транспортного потока, чересполосица и др.) такое решение не всегда является возможным.

На основе анализа графических материалов подземных пространств ряда городов США (Бостон, Нью-Йорк), Великобритании (Лондон, Дублин, Глазго), Европы (Брюссель, Варшава, Нидерланды) сформированы концептуальные модели оформления подземных пешеходных переходов.

Эскизные концептуальные зарисовки иллюстрируют способы колористического оформления, которое способствует иному визуальному пространственному восприятию, а также добавляют переходам художественную и эстетическую ценность. Идея оформления переходов может быть также использована с социальной функцией, к примеру, проведение проектов, вовлекающих художественные сообщества города, которые могут внести свой вклад в оформление.

1. Модель значимого, эстетически ценного и цельного пространства с использованием концепции «миф и место», где за основу отвечает культурная и историческая составляющая для формирования пространства.



Рис. 10. Проектное предложение, основанное на первой модели

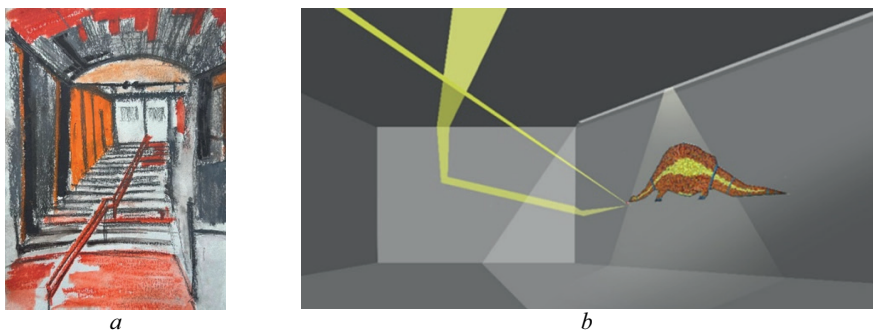


Рис. 11. Эскиз проектного предложения, основанный на второй модели (а); проектное предложение, основанное на второй модели (b)



Рис. 12. Коллаж, основанный на предложении по цветовому решению, основанном на третьей модели

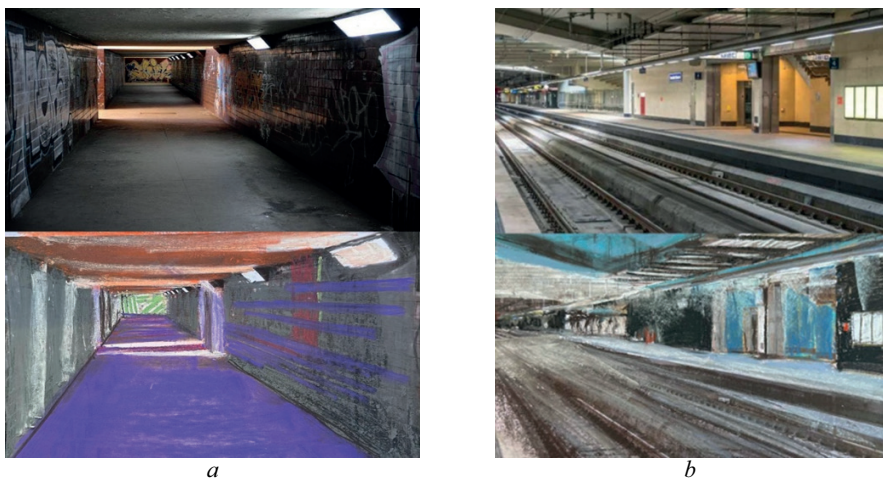


Рис. 13. Коллаж, основанный на предложении по цветовому решению, основанном на четвертой модели

Данная модель основывается на концептуальной, исторической, культурной и философской составляющей объекта, его расположении в структуре города. Основным приемом модели является корректное отображение идейной составляющей (рис. 10).

2. Модель «пространство – арт-объект» — значимый объект в структуре города, но оформление

не привязано к истории места, выступает самостоятельной художественно-эстетической единицей.

Данная модель основывается на индивидуальном видении проектировщика с учетом значимости объекта. Рекомендуемыми приемами модели являются: уникальное колористическое решение, использование приемов историзма, выделение уникализи-

Предлагаемые модели		
Предлагаемая модель	Отличительный признак пространства	Принцип проектного решения
1	Проектируемый объект обладает неотъемлемой культурной/исторической составляющей	Концептуальное предложение, основанное на подходе «миф и место»
2	Проектируемый объект, значимый в структуре города, но не имеет культурной/исторической составляющей	Концептуальное предложение, основанное на создании самостоятельного художественно-эстетического пространства
3	Проектируемый объект, протяженный и линейный	Концептуальное предложение, основанное на принципе орнаментальности с уточнением композиционной равнозначности технологий (окраса, панели и т.д.) и композиции, основанной на соотношении массы
4	Проектируемый объект находится на периферии и требует рационального подхода к оформлению	Концептуальное предложение, основанное на применении колористического членения пространства с использованием простых и доступных материалов

рованных физических объектов локальной среды архитектурно-пространственным способом (рис. 11).

3. Модель протяженного пространства, использующая принцип орнаментальности с уточнением композиционной равнозначности технологий (окраса, панели и т.д.) и композиции, основанной на соотношении массы.

Эта модель основывается на художественной теории композиции, членении пространства и колористическом акцентировании (рис. 12).

4. Модель для периферийных объектов с минимальными затратами при помощи применения колористического членения пространства с использованием простых и доступных материалов.

Данная модель основывается на стратегии экономической эффективности при сохранении художественной составляющей, учитывая значимость и расположение объекта в структуре города (рис. 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью представленных методов проведения исследования, в ходе которого проанализированы примеры в структуре городов Европы, России, США, выявлены стилевые и сюжетные направления концепций оформления, выявлена особая значимость

утилитарных коммуникационных объектов в структуре города.

Предлагаемые модели представлены в таблице.

На основе значимости объекты типизируются:

- 1. Объекты доминирующие («архитектурные акценты городской среды»).
- 2. Объекты, формирующие урбанистический каркас (ключевые элементы презентации городской структуры).
- 3. Периферийные (фоновые) объекты.

Для типизированных объектов предлагаются также способы реализации:

- применение экономически эффективных материалов и технологий: декоративно-отделочные работы (формирование эстетически выразительного облика реконструируемых пространств за счет обновления фасадных плоскостей, сводчатых элементов и кровельных покрытий);
- комплексная реконструкция.

Также предложены способы преобразования коммуникационного подземного пространства с учетом основных художественных и архитектурных приемов.

Предлагается четыре концептуальные и универсальные модели (табл.). Также на основе концептуальных моделей представлены проектные решения с учетом основных характеристик объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gadamer H.G. Truth and method. 2nd rev. ed. Continuum, 2004. 601 p.

2. Lynch K. The image of the city. MIT Press, 1960.

3. Глазычев В.Л. Урбанистика. М. : Европа, 2008. 219 с.

4. Красильникова Э.Э. Ландшафтный урбанизм. Теория — практика. Волгоград : Областные вести, 2015. 156 с. EDN WMICJL.

5. Нефедов В.А. Городской ландшафтный дизайн. СПб. : Любавич, 2020. 317 с.

6. Вергунов А.П., Денисов М.Ф., Ожегов С.С. *Ландшафтное проектирование*. М. : Высшая школа, 1991. 240 с.

7. Ревзин Г. Как устроен город будущего. М. : Strelka Press, 2022.

8. Джекобс Дж. Смерть и жизнь больших американских городов / пер. с англ. Л. Мотылев. М. : Новое издательство, 2011. 457 с.

9. Meskhi B.S., Evenko M.G., Vorobeveva A.M. The concept of the settlements' urban linear spaces formation in the southern region of Russia (on the example of Taganrog street in Rostov-on-Don) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/913/3/032014. EDN PWZXEG.

10. Шеин В.В. Эстетические модели интеграции восстановленных промышленных объектов в окружающую застройку. М. : ВНИИТАГ, 2021.

11. Гольдзамт Э.А. Урбодизайн: Проектирование городской среды в аспекте художественного восприятия. М. : Стройиздат, 1990. 256 с.

12. Воробьева А.М. Особенности архитектурно-ландшафтной организации городов Северо-Кавказского региона // ARCHITECTION. 1998. № 111–1У. С. 57–61.

13. Волошинова Л.Ф. Знакомьтесь: Большая Садовая. Кн. 2: От Темерника до Будённого про-

спекта. Ростов-на-Дону: Донское издательство, 2023.

14. Vorobieva A. Modern Approaches to the Preservation of Monuments of Cultural Heritage in the Structure of Rural Settlements // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Pp. 2954–2960. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_331

15. Григорьева Е.А. «Османизация» Парижа и ее социальные последствия // Вестник Московского университета. Серия 8: История. 2021. № 1. С. 25–40. EDN FYOZRD.

16. Vorobeveva A. Modern public parks based on Southern Russian cities in relation of the historical aspects and transformation of their natural landscape // Tasting the Landscape, 53 IFLA World Congress. 2016. 350 p.

17. Vorobyeva A.M. Evolution of Landscape Architecture // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. Pp. 856–861. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.856

18. Древаль М.Р., Шеин В.В. Данные социологического опроса населения и профессионального архитектурного сообщества. 2025.

19. Вентури Р., Скотт-Браун Д., Айзенур С. Уроки Лас-Вегаса: забытый символизм архитектурной формы / пер. с англ. М. : Strelka Press, 2015. 144 с.

Поступила в редакцию 16 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 14 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерия Вячеславовна Шеин — доцент, Школа архитектуры, дизайна и искусств; Донской государственный технический университет (ДГТУ); 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; SPIN-код: 7697-6483, РИНЦ ID: 929603, ORCID: 0000-0002-3843-2058; valeriashein@gmail.com;

Мелания Романовна Древаль — бакалавр, Школа архитектуры, дизайна и искусств; Донской государственный технический университет (ДГТУ); 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; ORCID: 0009-0009-8537-3861; melanidreval@yandex.ru.

Вклад авторов:

Шеин В.В. — научное руководство, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, итоговые выводы.

Древаль М.Р. — сбор и обработка материала, написание и редактирование статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Art is a wonderful means of dialogue between people of different eras and generations, and of drawing on each other's experiences. In other words, it is both a tribute to tradition and a form of innovation [1]. Artistic expression integrated into the urban environment has long ceased to be merely a decorative element. It fulfils important social and cultural functions, shaping the identity of a place [2] and influencing people's emotional state and, ultimately, the quality of life in an urbanized environment [3].

From an urban planning perspective, public spaces are becoming a crucial element in shaping a city's visual identity [4]. They create a distinctive atmosphere that attracts both visitors and residents, forming an emotional landscape and contributing to the development of a visual and psychological socio-cultural environment [5]. It is precisely a holistic approach to the design of spaces, or conversely, a focus on finer details within the urban context [6], that can become a compositional focal point and, consequently, a centre of public attraction [7], in accordance with the principles of organizing viable urban spaces [8].

Drawing on the experience of design theories, the contemporary architectural approach has developed a new perspective on the city's appearance and has adopted the multifunctional use of transport and pedestrian routes, junctions and urban areas. Thus, these elements are assigned a key role in the city's structure [9].

MATERIALS AND METHODS

The following methods were used in the study:

- visual analysis — an examination of the design of underground utility spaces according to specific categories (colour scheme, age, thematic features, and their role in shaping the city's visual appearance);
- the hypothetical-deductive method of inquiry;
- a sociological survey;
- photographic documentation;
- graphic illustrations.

RESEARCH RESULTS

Underground public spaces are an important functional feature and an integral part of urban infrastructure¹. Like any other component of the whole — that is, the modern city — underground walkways can be used not only as a utilitarian element, but also as a kind of art gallery reflecting the cultural identity of the region [10].

The aim of this study is to analyze the significance of utilitarian underground passageways within the urban fabric and, as a result of this analysis, to identify optimal, conceptual and universal approaches to the design of underground communication spaces, taking into account artistic, aesthetic and architectural aspects through the application of categories (colour scheme, texture and materials, thematic features, as well as their role in shaping the city's visual appearance).

Research objectives:

- to analyze existing underground spaces within the urban fabric of cities in Europe, Russia and the USA;
- to identify stylistic and thematic trends in the design of pedestrian crossings within the urban fabric;
- to propose a classification of existing underground spaces according to their location within the urban fabric, based on a conceptual and semiotic core;

¹ Materials on urban development strategies: Rostov-on-Don City Administration. Rostov-on-Don, Municipal Press; 2023.

- to propose conceptual models for transformation that optimize the interaction between the visual-aesthetic and functional components of underground transport spaces.

Depending on the status and function of a site within the urban fabric, different types of spatial regeneration may be employed.

Sites are categorized as follows:

- a site of heightened significance (“the face of the city”);
- a site significant in the context of presenting the urban structure;
- a peripheral site.

Accordingly, depending on the type of significance, the following implementation approaches are proposed:

- the use of economically viable materials and methods: plastering, painting (creating an aesthetically pleasing visual image of the spaces being reconstructed through cosmetic repairs to vertical structures, arches and surfaces);
- reconstruction.

A significant site is considered within the context of the “myth/place” concept. This concept centres on the relationship between a place's location and its historical and cultural context. Another important perspective for understanding a place is the presence of an addressee — an individual who experiences their surroundings, absorbs their meanings and emotional messages, and is capable of expressing an image of those surroundings through their own creative work.

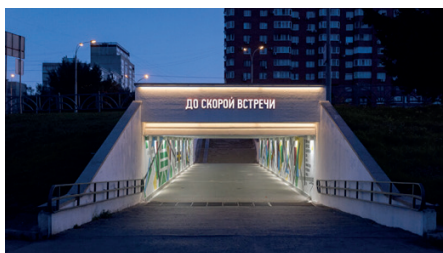
Examples of the design of utilitarian facilities for pedestrians and transport (pedestrian crossings, underground stations, etc.) depending on the type of facility.

Russia, Yekaterinburg

This example employs a design approach based on the concept of “myth and place”, as the site holds significance within the context of the city's urban fabric. Conceptually, the site is linked to its location, situated close to the V.V. Mayakovsky Central Park of Culture and Leisure; the design incorporates elements of the “Futurism” art movement, which alludes to the poet's work (Fig. 1, a).

The Netherlands, Overijssel, Zwolle, Time Tunnel

This example utilizes the principle of ornamentation in the design of the space, which creates additional dynamism, whilst the colour scheme is understated, as the structure serves as a connecting element rather than



a



b

Fig. 1. An underground pedestrian underpass in Yekaterinburg, Russia (a); and in Zwolle, Overijssel, the Netherlands (b)

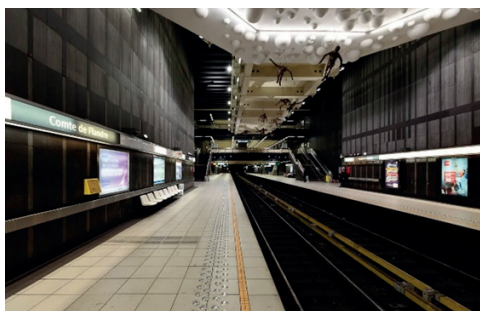


Fig. 2. “Count of Flanders” metro station in Brussels, Belgium

an extensive one. The proposed model features a more contrasting and vibrant colour scheme (Fig. 1, b).

Belgium, Brussels, “Graaf van Vlaanderen” metro station

The principle of minimizing costs whilst maximizing the artistic component of the design is applied, i.e. a strategy of cost-effectiveness. This methodology stems from a profound philosophical concept of the environment, where minimal financial investment blends harmoniously with the visual expressiveness of the final result.

“16 Icaris” consists of sixteen figures suspended from the ceiling, arranged at different levels in the direction of the planetarium. “The bodies, arms and legs assume various positions, but all of them undoubtedly evoke forward movement, the gravitational pull of the flow towards the concentration of the planets, which draws one in like a new, unknown world, full of light and enchantment”, explains the artist (Fig. 2).

Russia, Rostov-on-Don

Rostov-on-Don is replete with artistically designed utilitarian structures that employ a variety of techniques,

taking into account their form, scale, location and history. The mosaic panels located in the underpasses of Rostov-on-Don are a unique phenomenon in an aesthetic context. This is an exceptional combination of a structure’s design and the endowment of it with not only a utilitarian function but also artistic and aesthetic value.

The motifs convey a sense of local identity; not only narrating the dreams and fantasies of Soviet citizens regarding the conquest of space, but also recounting and illustrating historical events of the past, scenes from everyday life and, most importantly, regional distinctiveness [11], which reflects the characteristic features of the architectural and landscape organization of the region’s cities [12]. These projects not only enhance the visual perception of space, but also create points of attraction for city dwellers and tourists.

For visual reference, photographs of the mosaic panels are attached, accompanied by detailed descriptions categorized as follows.

Series of panels “From the Maternity Ward to the Graduation Ceremony”

The narrative arc — the life cycle of a Soviet citizen — cannot fail to move the viewer [12]. The series consists of five murals that illustrate specific stages of a person’s life — their development as an individual [13, 14]. In terms of composition, it contains a number of valuable features that encourage the viewer to engage with the work, thereby giving rise to the phenomenon of postmodern fusion within the context of contemporary approaches to the preservation of cultural heritage [15]. In the first image, the compositional centre is a gathering of people; there is also a psychological narrative technique that draws the viewer’s attention to the scene

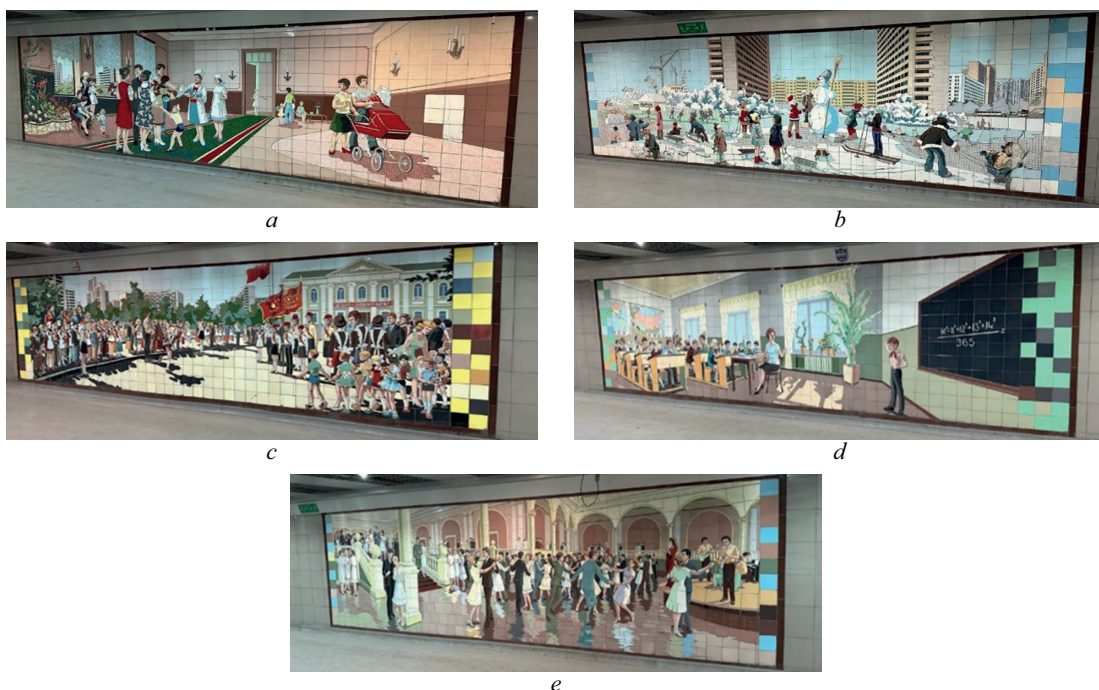


Fig. 3. Panel series “From the Maternity Ward to the Graduation Ceremony”



Fig. 4. Panel “The Heroic Stand of Oganov’s Battery in the Battles Against German Forces”

of human interaction. A telling moment is the female figure in a floral dress who is “high-fiving” her new brother.

The colour scheme is kept in neutral tones, appropriate to the situation. From a semiotic perspective, it is interesting to note the use of green to highlight the carpeted path leading to the doors through which the newborns are carried out — thus creating a direct association with new life (the colour green). The condition of the panel is assessed as well-preserved; however, minor restoration of the mosaic details is required, in which case the restoration method is applied (Fig. 3, a). Series of panels “From the Maternity Ward to the Graduation Ceremony” is shown in Fig. 3.

The composition of the second image also catches the eye; one is drawn to observe what the children are doing, with its wealth of detail and a colour scheme that is authentically in keeping with the winter landscape. The work is of historical interest, depicting typical Soviet-era housing from the second half of the 20th century. Over time, this will fade into oblivion, just as the next image shown here will, lending the work an existential context. The mood of the panel evokes a sense of nostalgia linked not only to the spirit of the times but also to universal memories of childhood. The panel is in need of restoration (Fig. 3, b).

The third panel, depicting the initiation ceremony into the Young Pioneers, evokes nostalgic associations with the Soviet era. The work stands out for its meticulous attention to detail and skillful use of colour, making it one of the most expressive in the series. The condition of the panel is assessed as well-preserved (Fig. 3, c).

The fourth image stands out compositionally through the introduction of a powerful focal point in the form of a school blackboard, specifically a mathematical equation that only a lazy local resident would have failed to attempt to solve. The restrained colour palette evokes associations with school life, which enhances the psychological impact of the work. The condition of the panel is also described as well-preserved (Fig. 3, d).

The final piece in the series, dedicated to the school-leavers’ ball, emphasizes the cyclical nature of life. The colour scheme of this work is one of the most successful in the series, highlighting the artists’ skill in conveying an emotional atmosphere. The composition is classical, with a sense of depth on the picture plane; the warm colour scheme of the ballroom symbolizes the successful completion of this stage of life and sets the tone for a positive, bright vision of the future. The figures are engaged in a joyful, lively interaction.

Series of panels “From the Maternity Ward to the Graduation Ceremony” is a historically, artistically and aesthetically valuable and cohesive work of monumental decorative art. It combines deep emotional engagement, meticulous detail and rich semiotic content, making it an important subject for study in the context of cultural heritage (Fig. 3, e).

Panel “The Heroic Stand of Oganov’s Battery in the Battles Against German Forces”

This work is dedicated to one of the key events in the country’s history — the Great Patriotic War [16]. The subject matter, which evokes a deep emotional response, combines a patriotic spirit with a sense of nostalgic longing, making it resonate with millions of people [17]. The historical context is conveyed clearly and authentically, emphasizing the significance of the events of that time [18].

The colour scheme is rendered in cool, complex tones, befitting the winter landscape and the harsh spirit of wartime. This creates an atmosphere of tension whilst simultaneously emphasizing the realism of the depiction.

However, the composition of the mural, which spans the entire wall of the underpass, appears stretched, which somewhat disperses the viewer’s focus. The lack of clear focal points and the sheer scale of the image make it difficult to perceive the work as a unified whole. Despite the stretched nature of the composition, this allows the viewer to fully immerse themselves in the atmosphere evoked by the mural. The series remains an important artistic and historical artefact, conveying the spirit of the era and the emotional depth of the events. It serves as a reminder of the heroism and tragedy of the past, preserving the memory for future generations. To improve its reception, one might consider adding compositional focal points or dividing the mural into thematic sections (Fig. 4).

Historical Panel “Launching Ships into the Temernik River”

The composition is thematically dedicated to a pivotal event in the history of the Don region, namely the construction of the Russian flotilla during Peter I’s Second Azov Campaign. In terms of composition, the panel is executed in a concise style, divided into main sections to depict not only the central narrative but also Cossack daily life. The concept of “myth/place” is clearly evident in this panel, as the subject matter is fundamental to the region in which it is located.

The colour scheme is one of the most successful among those under consideration; it clearly draws atten-



Fig. 5. Mosaic panel: *a* — “Launching Ships into the Temernik River”; *b* — at the pedestrian crossing at the intersection of Bolshaya Sadovaya Street and Universitetsky Lane

tion to the main scenes, whilst also reflecting the spirit of the era and the geographical context of the subject matter. The mural is a historically significant artefact illustrating the local course of history. Its overall condition is satisfactory. Minor restoration is required (Fig. 5, *a*).

Mosaic Panels in the Pedestrian Underpass at the Intersection of Bolshaya Sadovaya Street and Universitetsky Lane

This is the only mosaic at the specified address, standing out from the rest thanks to its distinctive approach to rendering the image. Its unique design, which creates a sense of depth by being recessed into the wall, captures the eye and lends the work a sense of expressiveness. Although, from a compositional point of view, the presence of just one mosaic in the passageway could be seen as a drawback, on the other hand, it makes it unique and memorable. A certain sense of diversity arises from the compositional design of this passageway.

The colour scheme is neutral; however, the blue details could be replaced with a more harmonious colour, such as green, which is opposite the red shades used on the colour wheel. This would enhance the compositional integrity of the work.

The condition of the mosaic is assessed as fairly good, which allows it to be preserved as a striking and unusual feature of the urban landscape (Fig. 5, *b*).

A separate and rather important aspect is the reflection of cultural identity in the project under consideration. Local symbols and motifs are used here, which

emphasizes its uniqueness. Overall, the entire project has been executed in a way that perfectly captures the cultural ethos of Rostov-on-Don, as well as the life and dreams of a Soviet citizen.

When discussing the social impact of the design of utilitarian spaces, reference should be made to the sociological surveys conducted as part of the research, which targeted different audiences (the professional community and the general public) [19], which note that the general public perceives a potential danger in unadorned and unlit pedestrian crossings, whilst the professional community emphasizes the importance of designing utilitarian spaces and selecting appropriate artistic techniques depending on the nature of the space.

Four conceptual and universal models are proposed.

1. A model of a meaningful, aesthetically valuable and cohesive space based on the “myth and place” concept, in which cultural and historical elements form the basis for the creation of the space (Fig. 6).

2. The “space – art object” model is a significant feature within the urban fabric, but its design is not tied to the history of the site; it stands as an independent artistic and aesthetic entity, which is consistent with the concept of architecture as a symbol.

This model stands out as an approach to the design of underground spaces. The universal “explosive” scheme for shaping interior spaces is not applicable here, as this approach considers innovation within the context of a specific object.



Fig. 6. Exploded view of the first conceptual model (*a*); internal view of the first conceptual model (*b*)

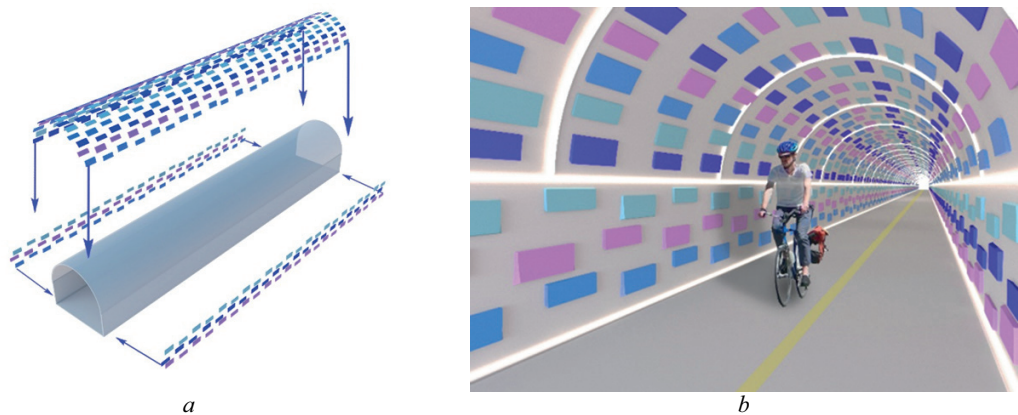


Fig. 7. Exploded view of the third conceptual model (a); interior of the third conceptual model (b)

3. The model of an extended space, utilizing the principle of ornamentation whilst emphasizing the compositional equivalence of techniques (colour schemes, panels, etc.) and a composition based on the relationship between masses (Fig. 7).

4. A model for peripheral sites that minimizes costs through the use of colour-coded spatial division, utilizing simple and readily available elements (Fig. 8).

The design proposals are based on a previously put forward concept for the design of the city’s utilitarian structures. The main objective is to utilize this space as a multifunctional area, integrate it into the urban “landscape” and create a comfortable urban environment. Depending on the status and function of the facility within the urban fabric, different types of spatial regeneration may be employed, taking into account the classification of facilities proposed in the methodological section of the study.

1. Using the city of Rostov-on-Don as an example. The design proposals include a new overall colour scheme for the design of underground pedestrian cross-

ings and existing mosaic panels. When reimagining the design, it is important to take into account the accent lighting of the mosaics and the surrounding colour scheme, which will also draw the viewer’s attention to the panels without competing with them. Furthermore, the colour scheme should be monochromatic, using shades that correspond to the overall style of the underpass, to enhance psychological perception and create a comfortable urban environment.

When considering the aesthetic and social significance of these structures, it is worth noting that the artistic design of underpasses transforms them from “invisible” areas into significant elements of the urban landscape. This contributes to the creation of an aesthetically valuable environment, which is particularly important in densely built-up areas and influences the perception of the city.

The first colour scheme is based on the technique of highlighting the mosaic panels. By integrating them into the “grey mass”, the viewer’s attention is immediately captured; yet the surrounding environment is not

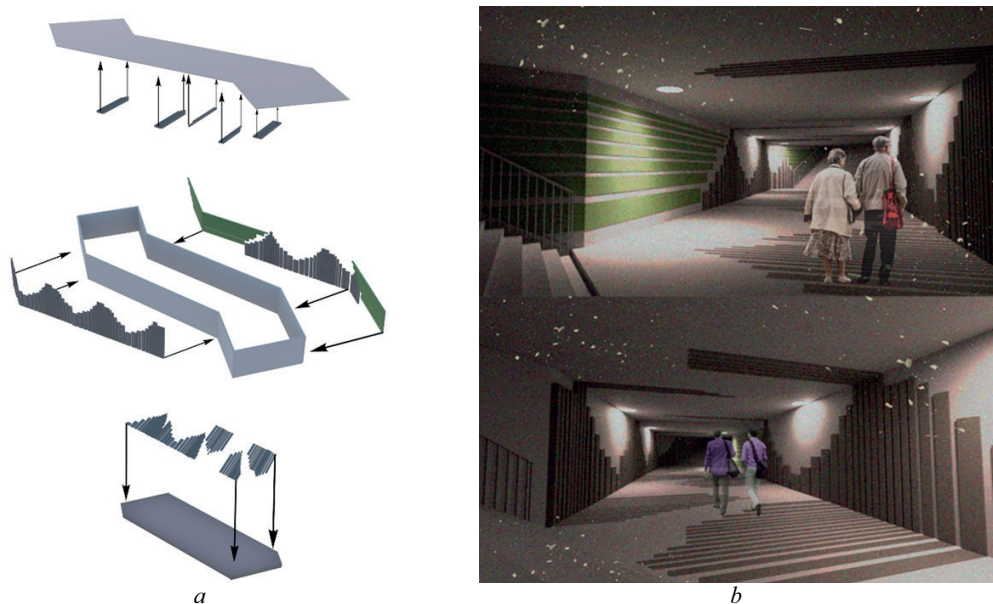


Fig. 8. Exploded view of the fourth conceptual model (a); interior of the fourth conceptual model (b)

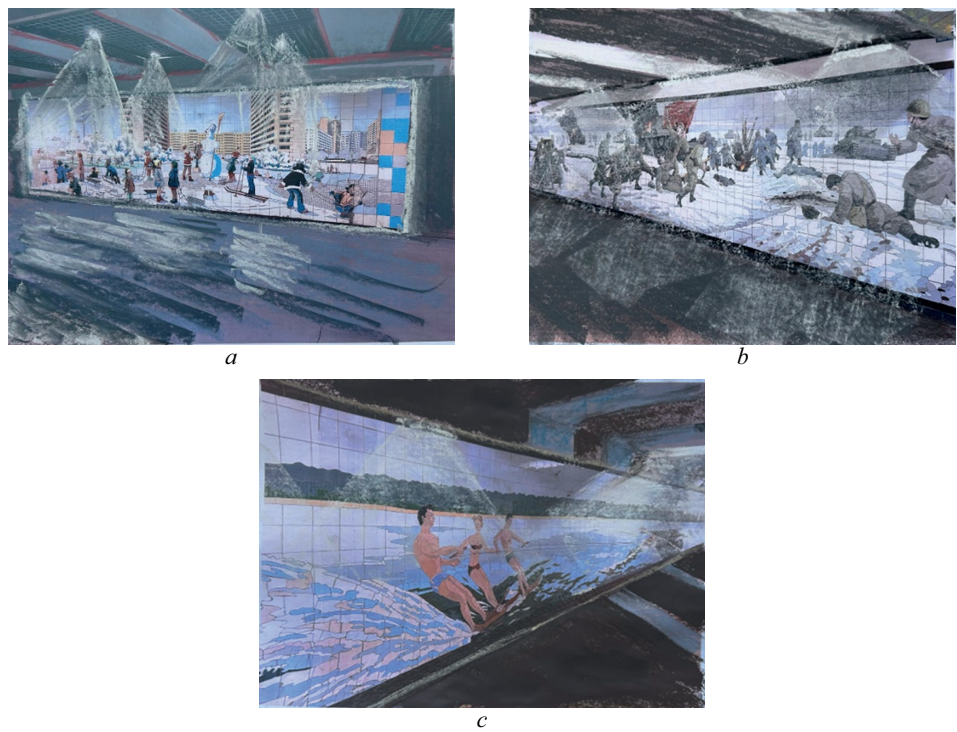


Fig. 9. Sketch of a project proposal for Rostov-on-Don



Fig. 10. Design proposal based on the first model

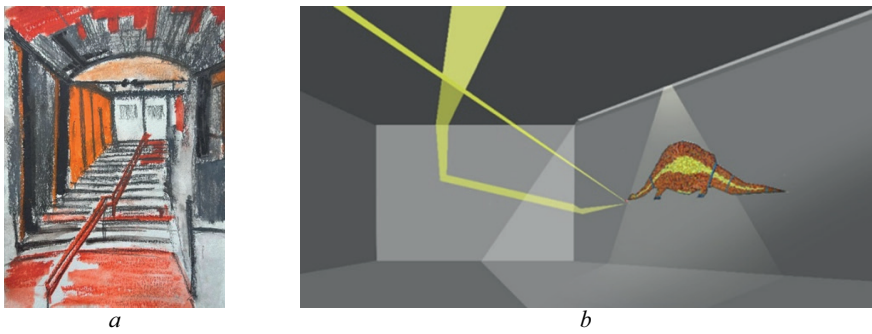


Fig. 11. Sketch of the design proposal based on the second model (a); design proposal based on the second model (b)



Fig. 12. A collage based on a colour scheme proposal derived from the third model

overwhelming but, on the contrary, encourages exploration of the panels (Fig. 9, a).

The second solution is based on the principle of seamlessly integrating the mosaic panel into its surroundings, thereby creating a compositionally cohesive underground space (Fig. 9, b).

The third solution also involves creating a focal point, but within the overall design. This is a more contrasting approach, which will help to combine more natural colour combinations with a universal and pragmatic overall colour scheme (Fig. 9, c).

2. Examples from overseas underground pedestrian crossings.

In European practice regarding the organization of underground spaces, it is quite rare to introduce design techniques for underground pedestrian crossings that are unique in terms of their artistic and aesthetic characteristics, as European urban planning trends tend to favour the elimination of such spaces by relocating the crossing to the surface. However, for a number of reasons (traffic

flow management, cross-block access, etc.), this solution is not always feasible.

Conceptual models for the design of underground pedestrian crossings have been developed based on an analysis of visual materials depicting underground spaces in a number of cities in the USA (Boston, New York), the UK (London, Dublin, Glasgow) and Europe (Brussels, Warsaw, the Netherlands).

Preliminary conceptual sketches illustrate approaches to colour schemes that foster a different visual and spatial perception, whilst also adding artistic and aesthetic value to the crossings. The idea of designing these crossings can also serve a social function; for example, by running projects that involve the city’s artistic communities, who can contribute to the design.

1. A model of a meaningful, aesthetically valuable and cohesive space, drawing on the “myth and place” concept, in which cultural and historical elements form the basis for the shaping of the space.

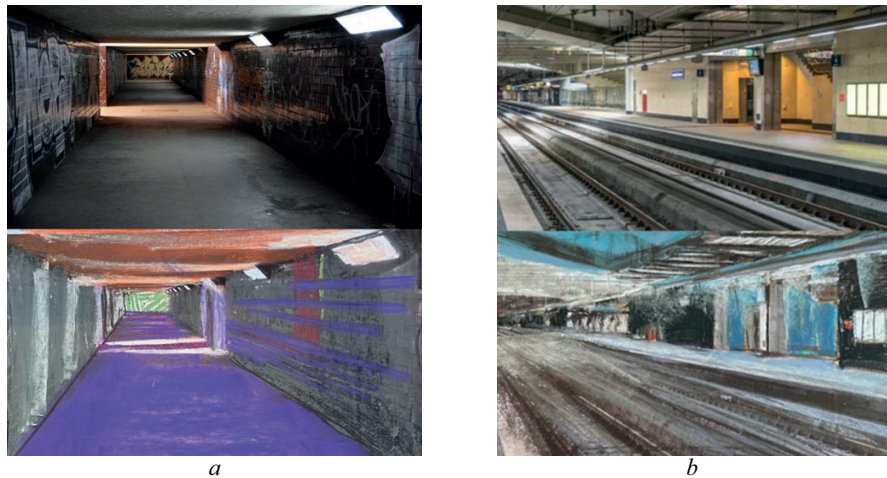


Fig. 13. A collage based on a colour scheme proposal derived from the fourth model

Proposed models

The proposed model	A distinctive feature of space	Design principle
1	The proposed project has an integral cultural and historical dimension	A conceptual proposal based on the “myth and place” approach
2	The proposed development is significant within the urban fabric but has no cultural or historical significance	A conceptual proposal based on the creation of an independent artistic and aesthetic space
3	The project in question, which is extensive and linear	A conceptual proposal based on the principle of ornamentation, clarifying the compositional equivalence of techniques (colour, panels, etc.) and a composition based on the relationship between volumes
4	The proposed development is situated on the outskirts and requires a practical approach to its design	A conceptual proposal based on the use of colour to divide the space, utilizing simple and readily available materials

This model is based on the conceptual, historical, cultural and philosophical aspects of the site, as well as its location within the urban fabric. The key approach of the model is the accurate representation of its conceptual framework (Fig. 10).

2. The “space – art object” model — a significant feature within the urban fabric, but one whose design is not tied to the history of the site, functioning instead as an independent artistic and aesthetic entity.

This model is based on the designer’s individual vision, taking into account the significance of the object. Recommended techniques for this model include: a unique colour scheme; the use of historicist techniques; and the architectural and spatial highlighting of distinctive physical features of the local environment (Fig. 11).

3. A model of extended space that utilizes the principle of ornamentation, emphasizing the compositional equivalence of techniques (colour, panels, etc.) and a composition based on the relationship between volumes.

This model is based on the artistic theory of composition, the division of space and the use of colour for emphasis (Fig. 12).

4. A model for peripheral sites that minimizes costs through the use of colour-based spatial division, employing simple and readily available materials.

This model is based on a strategy of cost-effectiveness whilst preserving the artistic element, taking into account the site’s significance and location within the urban fabric (Fig. 13).

CONCLUSION

Using the methods presented, a study was carried out in which examples from the urban structures of cities in Europe, Russia and the USA were analyzed; stylistic and thematic trends in design concepts were identified; and the particular significance of utilitarian transport infrastructure within the urban fabric was highlighted.

The proposed models are presented in the Table.

Objects are categorized according to their significance:

1. Dominant objects (“architectural focal points of the urban environment”).

2. Objects that form the urban framework (key elements in the presentation of the urban structure).

3. Peripheral (background) objects.

Implementation methods are also proposed for these categorized objects:

- the use of cost-effective materials and technologies: decorative and finishing works (creating an aesthetically expressive appearance for the spaces being reconstructed by refurbishing façade surfaces, vaulted elements and roof coverings);

- comprehensive reconstruction.

Methods for transforming underground utility spaces are also proposed, taking into account key artistic and architectural techniques.

Four conceptual and universal models are proposed (Table). Design solutions based on these conceptual models are also presented, taking into account the key characteristics of the sites.

REFERENCES

1. Gadamer H.G. *Truth and method*. 2nd rev. ed. Continuum, 2004; 601.

2. Lynch K. *The image of the city*. MIT Press, 1960.

3. Glazychev V.L. *Urbanistics*. Moscow, Europa, 2008; 219. (rus.).

4. Krasilnikova E.E. *Landscape Urbanism: Theory and Practice*. Volgograd, Oblastnye Vesti, 2015; 156. EDN WMICJL. (rus.).

5. Nefedov V.A. *Urban Landscape Design*. St. Petersburg, Lyubavich, 2020; 317. (rus.).

6. Vergunov A.P., Denisov M.F., Ozhegov S.S. *Land-scape design*. Moscow, Higher School, 1991; 240. (rus.).
7. Revzin G. *How the city of the future is structured*. Moscow, Strelka Press, 2022. (rus.).
8. Jacobs J. *The death and life of great american cities* / Translated from English by L. Motylev. Moscow, Novoye Izdatelstvo, 2011; 457. (rus.).
9. Meskhi B.S., Evenko M.G., Vorobeveva A.M. The concept of the settlements' urban linear spaces formation in the southern region of Russia (on the example of Taganrog street in Rostov-on-Don). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/913/3/032014. EDN PWZXEG.
10. Shein V.V. *Aesthetic models of integrating restored industrial objects into the surrounding development*. Moscow, VNIITAG, 2021. (rus.).
11. Gol'dzamt E.A. *Urbodesign: Design of the Urban Environment in the Aspect of Artistic Perception*. Moscow, Stroyizdat, 1990; 256. (rus.).
12. Vorobieva A.M. Features of architectural and landscape organization of cities in the North Caucasus region. *ARCHITECTION*. 1998; 111-1U:57-61. (rus.).
13. Voloshinova L.F. Meet: Bolshaya Sadovaya. *Book 2: From Temernik to Budyonnovsky Prospekt*. Rostov-on-Don, Don Publishing House, 2023. (rus.).
14. Vorobieva A. Modern Approaches to the Preservation of Monuments of Cultural Heritage in the Structure of Rural Settlements. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023; 2954-2960. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_331
15. Grigorieva E.A. "Haussmannization" of Paris and it's social consequences Moscow University Bulletin. *Series 8: History*. 2021; 1:25-40. EDN FYOZRD. (rus.).
16. Vorobeveva A. Modern public parks based on Southern Russian cities in relation of the historical aspects and transformation of their natural landscape. *Tasting the Landscape, 53 IFLA World Congress*. 2016; 350.
17. Vorobyeva A.M. Evolution of Landscape Architecture. *Materials Science Forum*. 2018; 931:856-861. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.856
18. Dreval M.R., Shein V.V. *Data from a sociological survey of the population and the professional architectural community*. 2025. (rus.).
19. Venturi R., Scott Brown D., Izenour S. *Learning from Las Vegas: The Forgotten Symbolism of Architectural Form*. Moscow, Strelka Press, 2015; 144. (rus.).

Received September 16, 2025.

Adopted in revised form on February 14, 2026.

Approved for publication on March 3, 2026.

B I O N O T E S : **Valeriia V. Shein** — Associate Professor, School of Architecture; Design and Arts; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; SPIN-code: 7697-6483, ID RSCI: 929603, ORCID: 0000-0002-3843-2058; valeriashein@gmail.com;

Melani R. Dreval — bachelor, School of Architecture, Design and Arts; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-8537-3861; melanidreval@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Valeriia V. Shein — scientific supervision, methodology development, participation in development of educational programs and their implementation, final conclusions.

Melani R. Dreval — material collection, material processing, article writing and editing, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Влияние антропогенных факторов на изменение климата городов Арктической зоны Российской Федерации на примере Республики Коми

Анна Евгеньевна Коробейникова, Алина Андреевна Сокольникова
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день изменение климата в Арктической зоне является важной проблемой для мирового сообщества. Будучи крупнейшей страной в мире, Российская Федерация особенно уязвима к последствиям изменения климата из-за своей обширной территории, сложных климатических условий и особенностей географического положения. Цель исследования — анализ влияния антропогенных факторов на изменение климата в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) на примере Республики Коми и разработка решений для смягчения его негативных последствий.

Материалы и методы. Инструментами для оценки влияния антропогенных факторов на изменение климата в Республике Коми являются: пространственное ГИС-моделирование, аналитический метод, статистический анализ данных и картографирование. На основе этих методов исследования создается пространственная модель для выявления наиболее подверженных изменению климата районов.

Результаты. Разработанная методика позволяет определить урбанизированные территории АЗРФ, наиболее подверженные показателям изменения климата. Проведен анализ территории по количеству выбросов основных парниковых газов: углекислого газа (CO₂), метана (CH₄), оксида азота (NO_x). Проектный эксперимент произведен на примере Республики Коми. Приведен пример решения проблемы для снижения показателей по изменению климата АЗРФ.

Выводы. Выявлена необходимость принятия мер для снижения антропогенного воздействия на климатические изменения в Республике Коми. Результаты данного исследования могут быть полезными для принятия решений в области климатической политики на региональном и национальном уровнях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, антропогенные факторы, АЗРФ, жизнестойкий город, Крайний Север, Республика Коми, ГИС-моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коробейникова А.Е., Сокольникова А.А. Влияние антропогенных факторов на изменение климата городов Арктической зоны Российской Федерации на примере Республики Коми // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.10

Автор, ответственный за переписку: Анна Евгеньевна Коробейникова, anna-chega@mail.ru.

The influence of anthropogenic factors on climate change in the cities of the Russian Arctic, using the example of the Komi Republic

Anna E. Korobeinikova, Alina A. Sokolnikova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Today, climate change in the Arctic zone is an important problem for the world community. As the largest country in the world, the Russian Federation is particularly vulnerable to the effects of climate change due to its vast territory, difficult climatic conditions and geographical location. The purpose of this study is to analyze the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic zone of the Russian Federation, using the example of the Komi Republic, and to develop solutions to mitigate its negative consequences.

Materials and methods. Tools for assessing the impact of anthropogenic factors on climate change in the Komi Republic are: spatial GIS modelling, analytical method, statistical data analysis and mapping. Based on these research methods, a spatial model is being created to identify the areas most susceptible to climate change.

Results. The developed methodology makes it possible to identify the urbanized territories of the Russian Arctic that are most susceptible to climate change indicators. The territory was analyzed by the amount of emissions of the main greenhouse gases carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrogen oxide (NO_x). The design experiment was carried out using the exam-

ple of the Komi Republic. An example of applying a solution to the problem to reduce climate change indicators in the Arctic zone of the Russian Federation is given.

Conclusions. The necessity of taking measures to reduce the anthropogenic impact on climate change in the Komi Republic has been identified. The results of this article can be useful for decision-making in the field of climate policy at the regional and national levels.

KEYWORDS: climate change, anthropogenic factors, Russian Arctic, resilient city, Far North, Komi Republic, GIS modelling

FOR CITATION: Korobeinikova A.E., Sokolnikova A.A. The influence of anthropogenic factors on climate change in the cities of the Russian Arctic, using the example of the Komi Republic. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.10

Corresponding author: Anna E. Korobeinikova, anna-chega@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление климата, связанное, в первую очередь, с антропогенными выбросами парниковых газов, в течение последних десятилетий является общемировой тенденцией. Изменения климата подтверждаются на глобальных климатических моделях СМIP, служащих основой для современного анализа перемены климата. Информация СМIP, особенно новейшие сведения модели СМIP6, критически важна для формирования прогнозов и последствий трансформации климата. Тем не менее, несмотря на развитие климатического моделирования, в настоящее время ощущается нехватка специализированных градостроительных методик для оценки последствий изменения климата в городах и регионах.

Одним из наиболее наглядных показателей климатических перемен служит температура воздуха.

Рост среднегодовой температуры над сушей в период 1976–2020 гг. повышается на 0,179 °C каждое десятилетие [1–3]. Для подтверждения этого тезиса авторами составлены графики изменения температуры по данным, полученным из Earth Engine Data Catalog за последние три десятилетия (рис. 1).

Россия — единственная страна, где граница Арктики закреплена законодательно, указом Президента Российской Федерации выделена Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ). АЗРФ охватывает 9 регионов: четыре относятся к ней полностью: Мурманская область, Ненецкий автономный округ (далее — АО), Чукотский АО, Ямало-Ненецкий АО; пять частично: Республика Коми, Республика Карелия, Республика Саха (Якутия), Архангельская область, Красноярский край. Четыре приарктических региона включают в себя: Ханты-Мансийский АО — Югра, Камчатский край, Магаданская область. Площадь ар-

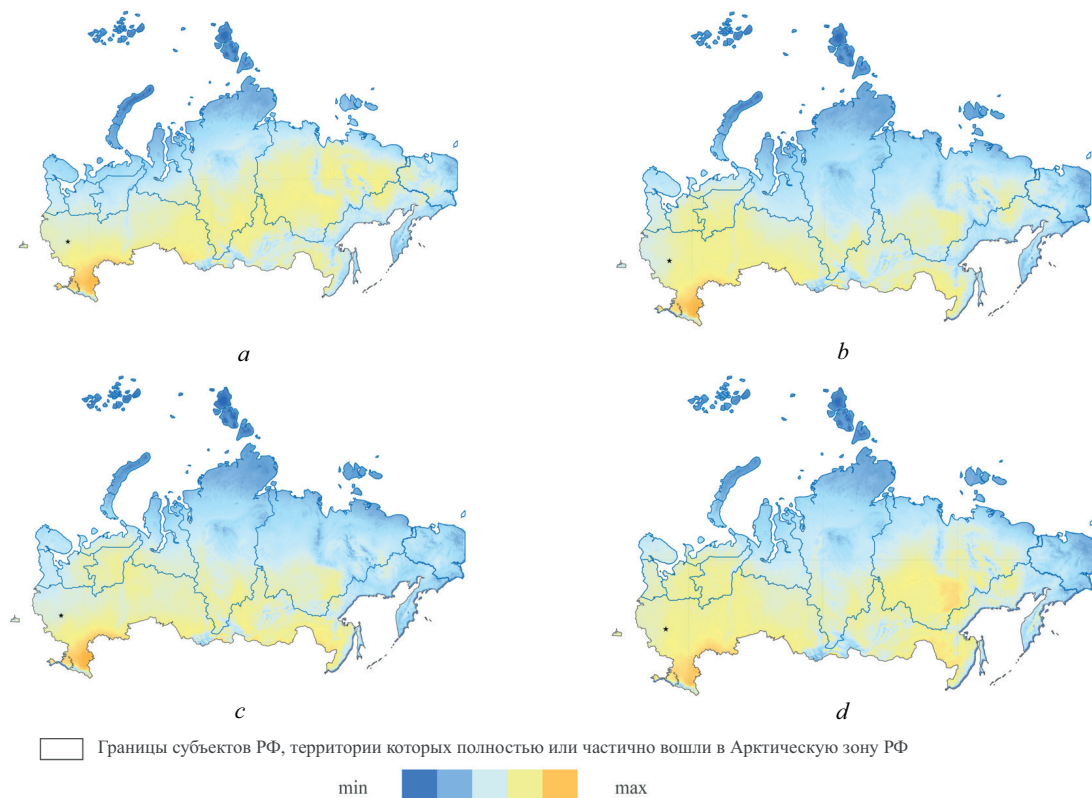


Рис. 1. Метеорологические данные Российской Федерации: а — 1991 г.; б — 2000 г.; в — 2015 г.; д — 2022 г. (по информации Earth Engine Data Catalog)

ктических территорий — 4,8 млн км² (28 % территории страны). Здесь проживает 2,6 млн человек, больше половины населения мировой Арктики.

На основе информации российских статистических ежегодников Федеральной службы государственной статистики проведен анализ среднемесячной температуры воздуха и количество осадков по регионам РФ. В 2020 г. произошел резкий скачок роста CH₄, что может свидетельствовать о наиболее значительном повышении температуры, которое было отмечено на всей территории АЗРФ:

- средняя фактическая температура января составляла −16,5 °С, отклонение от нормы 6,4 °С. Наибольшее отклонение от нормы в 2020 г. заметно в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО), это 6,8 °С (рис. 2, а);
- средняя фактическая температура июля — 14,7 °С, отклонение от нормы — 1,3 °С (рис. 2, б). Наибольшее отклонение от нормы также присутствует в СЗФО и составляет 2,1 °С;
- среднее количество осадков в июле 2003 г. — 69,5 мм, в 2020 г. — 62,3 мм (рис. 2, с);
- сравнивая графики среднемесячных показателей по регионам АЗРФ, можно прийти к выводу, что количество осадков прямо пропорционально температуре воздуха: чем теплее температура воздуха, тем большее количество осадков выпадает на поверхность Земли (рис. 2).

Анализ изменений температуры и осадков в период 2003–2022 гг. позволяет сделать вывод, что при-

чиной ускоренного в эти годы сокращения ледников является увеличение летней температуры воздуха с начала XXI в. на 1,5 °С и, в первую очередь, охватывает изменения на территории СЗФО. Последствия глобального потепления ощущаются не только в Арктическом регионе, но и далеко за его пределами [4–6].

Рост уровня парниковых газов начал ускоренно идти вверх после возобновления объема производства промышленности страны в 1926 г. и до 1990 г. (рис. 3). Одним из наиболее важных парниковых газов является диоксид углерода, такие газы, как метан и закись азота, также имеют влияние на глобальное потепление [7–9]. На рис. 3 отображены суммарные выбросы по трем парниковым газам. На графиках, основанных на данных OurWorldinData.org, выделен период 1930–1990 гг., где наблюдается продолжительный рост уровня парниковых газов (рис. 3, 4).

По сведениям Росгидромета рост концентрации парниковых газов на территории России в 2022 г. стал рекордным, в первую очередь углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄). Концентрация углекислого газа на территории РФ в 2022 г. возрастает по сравнению с 2020 и 2021 г. (рис. 3).

Вторая по значимости причина глобального потепления после углекислого газа — метан (CH₄) — бесцветный газ без запаха. С 1750 г. люди увеличили количество метана в атмосфере примерно на 150 %. Добыча ископаемых видов топлива, таких как нефть, газ и уголь, является крупнейшим источником выбро-

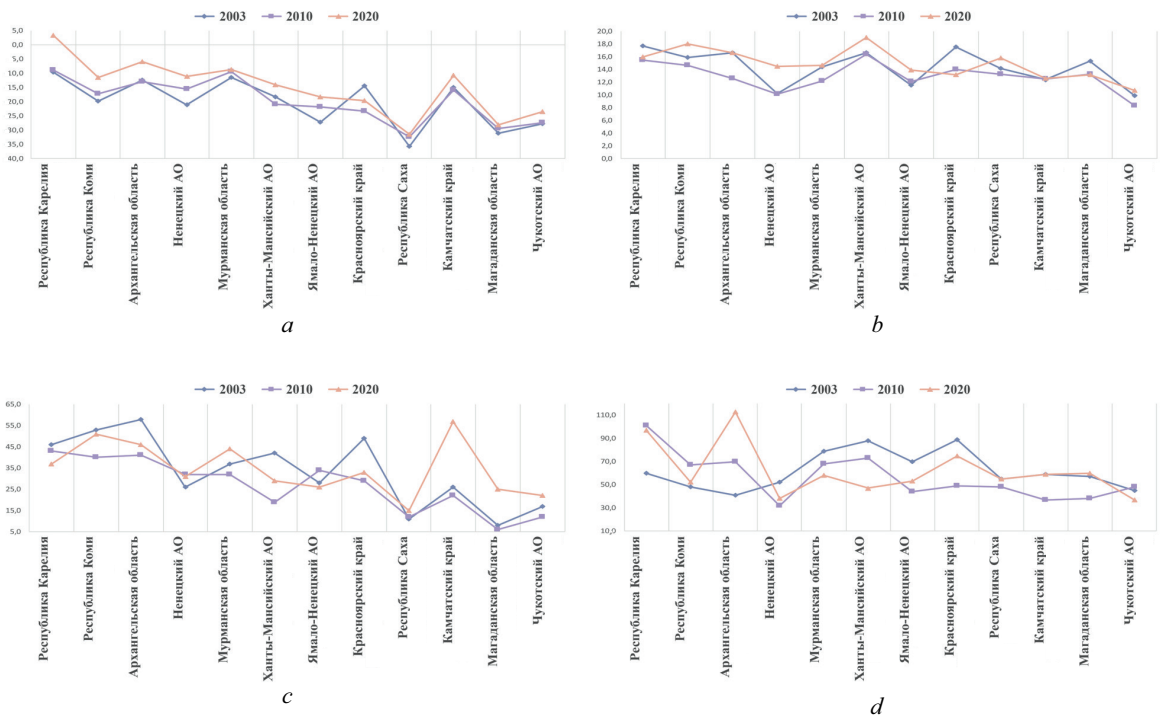


Рис. 2. Среднемесячные показатели по регионам АЗРФ: а — среднемесячная температура воздуха (январь); б — среднемесячная температура воздуха (июль); с — среднемесячное количество осадков (январь); д — среднемесячное количество осадков (июль) (российские статистические ежегодники Федеральной службы государственной статистики и Microsoft Excel)

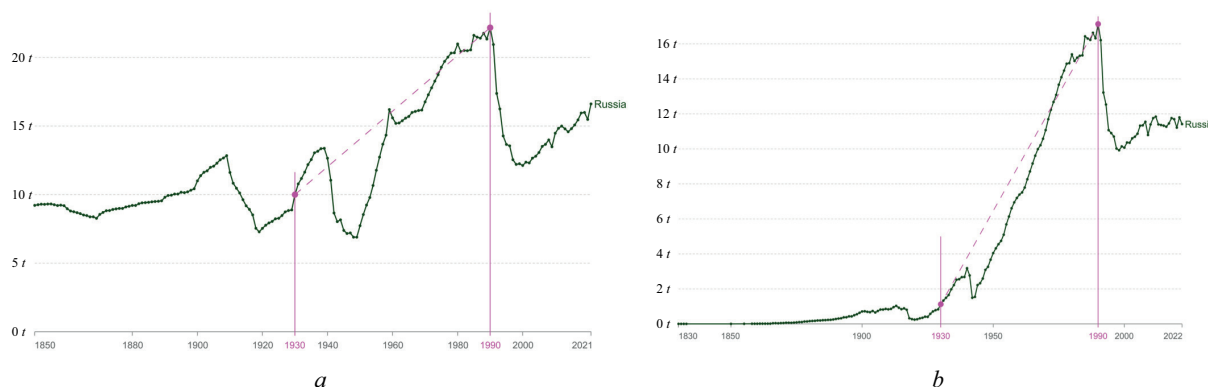


Рис. 3. Выбросы парниковых газов CO_2e по категориям (a); выбросы на душу населения CO_2 (b) (источники: OurWorldinData.org и Adobe Illustrator)

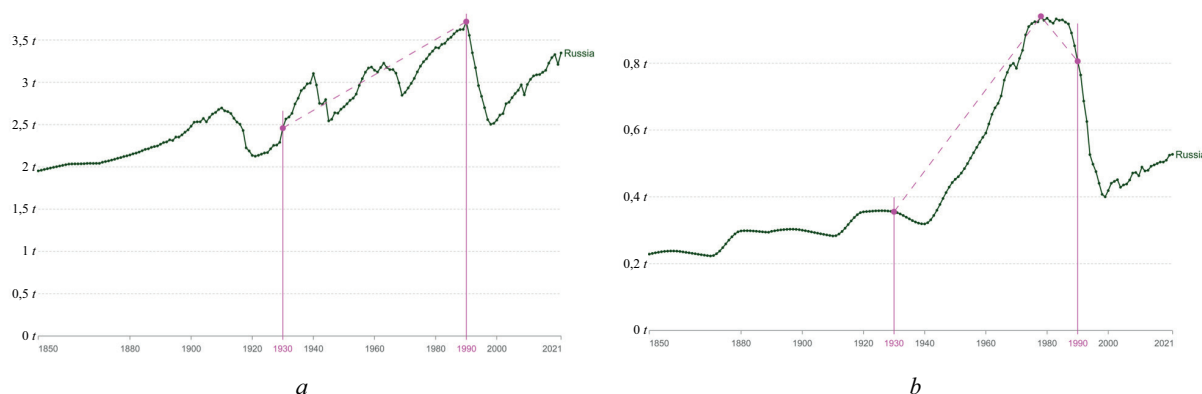


Рис. 4. Выбросы парниковых газов на душу населения: a — CH_4 ; b — NO_x (источники: OurWorldinData.org и Adobe Illustrator [13])

сов метана. Люди также увеличили выбросы метана из-за интенсивных методов ведения сельского хозяйства, животноводства и удаления отходов [10, 11].

Парниковые газы, такие как метан, остаются в атмосфере Земли, позволяя солнечному свету проходить через нее, но задерживая тепло [12, 13]. Одно недавнее исследование показало, что быстрое сокращение выбросов метана может замедлить скорость потепления Земли на 30 %. В 2020 г. среднегодовая концентрация метана на душу населения составляла 3,21 т, после чего произошел скачок до 3,35 т в 2021 г. (рис. 4, a).

Растущий спрос со стороны сельского хозяйства, транспорта, промышленности и энергетики привел к резкому росту уровней азотного загрязнения и связанных с ним выбросов парниковых газов [14]. Выбросы закиси азота (NO_x) от промышленности и сжигания, например, в 300 раз мощнее, чем CO_2 как парникового газа (рис. 4, b).

Метан и другие углеводороды в природном газе соединяются с оксидами азота, образуя озоновое загрязнение атмосферы (рис. 5) [15, 16]. На значительной части страны сохраняется тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова, при этом наблюдается увеличение максимальной

за зиму высоты снежного покрова на большей части страны. В процессе таяния многолетней мерзлоты, занимающей 63 % территории России, высвобождаются накопившиеся в замерзшей органике парниковые газы, в частности углекислый газ CO_2 и более агрессивный по воздействию на климат метан CH_4 [17–19]. Зона вечной мерзлоты активно осваивается благодаря запасам полезных ископаемых, но влияние температурных изменений влечет за собой серьезные последствия для инфраструктуры регионов Севера, что негативно скажется на зданиях и впоследствии приведет к их разрушению [20, 21].

Рост концентрации парниковых газов и современное потепление климата на всей территории земного шара непосредственно связаны с проблемой антропогенного воздействия [22, 23]. Хозяйственная деятельность человечества — использование природных ресурсов, существенное сокращение площади лесной поверхности, отсутствие ее возобновления, а в связи с этим заболачивание территорий, рост промышленных и городских территорий — все это повышает концентрацию парниковых газов и тем самым усиливает парниковый эффект, что приводит к росту среднегодовой температуры приземного слоя атмосферы.

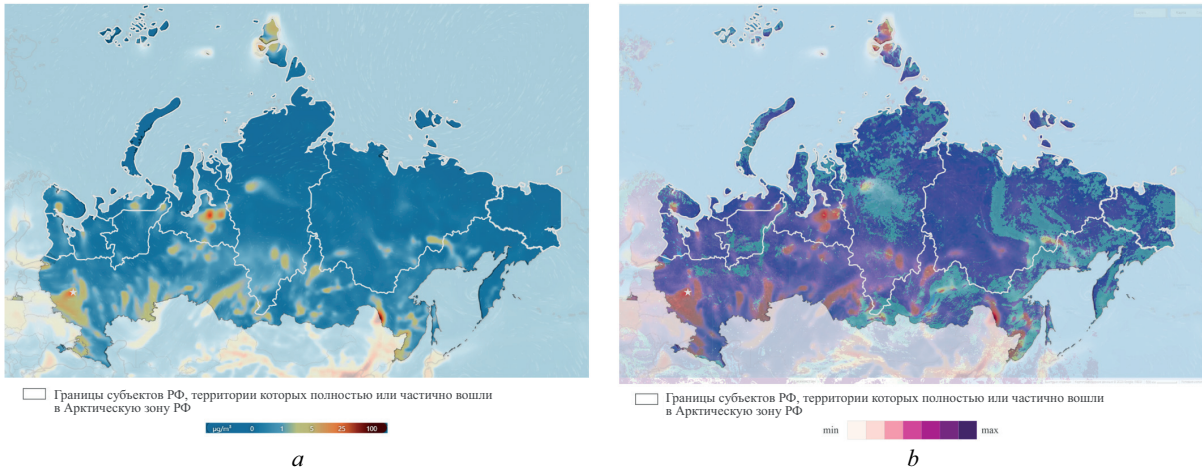


Рис. 5. Концентрация природных газов на территории Российской Федерации: *a* — NO_x ; *b* — $\text{NO}_x + \text{CH}_4$ (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Антропогенные факторы — это совокупность группы факторов, прямо или косвенно связанных с деятельностью человечества, влияющих на изменение и функционирование окружающей среды. Основным драйвером современного потепления является продолжающийся рост концентраций CO_2 , CH_4 , оксида азота NO_x (рис. 6).
Классификация ключевых антропогенных источников выбросов парниковых газов может бази-

роваться на различных критериях, таких как тип деятельности, масштабы или прямые и косвенные источники:
1) прямые источники:
• электростанции (особенно те, которые используют ископаемое топливо);
• угольные шахты (выбросы метана в процессе добычи);
• полигоны ТБО (метан от разложения органических отходов);

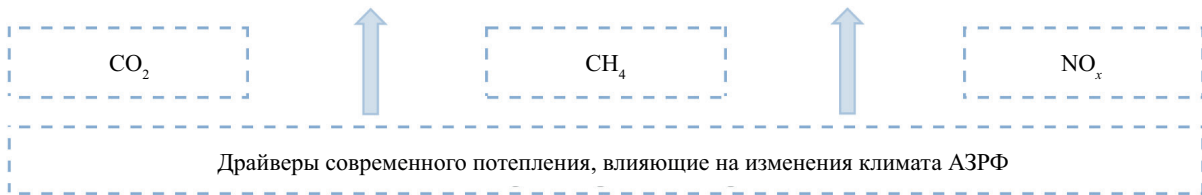


Рис. 6. Основные драйверы современного потепления

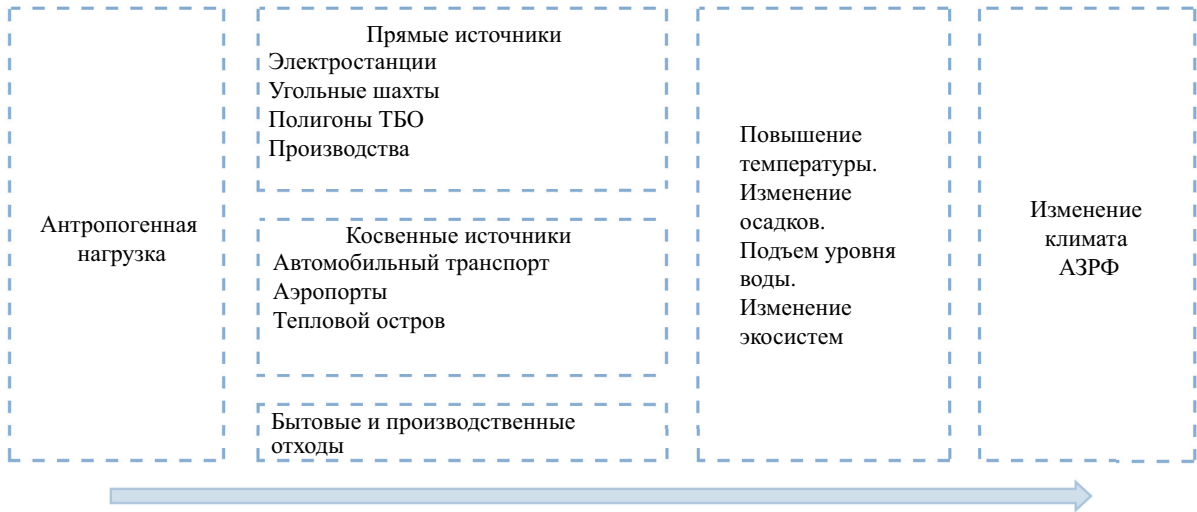


Рис. 7. Теоретическая модель влияния антропогенной нагрузки на изменение климата

- производства (зависит от отрасли, многие производства выбрасывают CO_2 и другие газы);
- 2) косвенные источники:
 - автомобильный транспорт (выбросы от сгорания топлива);
 - аэропорты (включают в себя как выбросы от самолетов, так и от сопутствующей инфраструктуры);
 - тепловой остров (не является источником в прямом смысле, но способствует повышению температуры и, как следствие, увеличению энергопотребления);
- 3) бытовые и производственные отходы:
 - могут быть источником как прямых, так и косвенных выбросов в зависимости от способа обращения с отходами и их переработки.

Влияние антропогенных факторов на изменение климата окружающей среды:

- повышение температуры;
- изменение осадков;
- подъем уровня воды;
- изменение экосистем.

На основе классификации основных антропогенных факторов разработана теоретическая модель влияния антропогенной нагрузки на изменение климата (рис. 7).

Для анализа исследуемой территории по количеству выбросов парниковых газов необходимо рассматривать территорию региона составными частями, в нашем случае по муниципальным районам. Инструментами для создания модели наиболее изменчивых территорий, подверженных изменению климата, являются:

- пространственное ГИС-моделирование позволяет изучать пространственные данные, включая распределение выбросов газов на территории;
- аналитический метод применяется для выявления закономерностей и трендов в сведениях о климате и выбросах;

- статистический анализ данных дает возможность оценить степень влияния различных факторов на выбросы парниковых газов;
- картографирование.

Исследование включает четыре ключевых этапа, приведенных на рис. 8.

Первый этап представляет собой сбор информации по изменению климата в регионе за последние десятилетия: метеорологические сведения, количество осадков, климат отдельной точки, вызванный эффектом острова тепла (Urban Heat Island, UHI).

На втором этапе методом картографического анализа выявляются места наиболее опасных отходов, что также влияет на биоразнообразие природы. Также определяются места расположения главных источников техногенного воздействия и выгружаются данные Climate Trace для установления местоположения крупных источников и оценки количественных выбросов в течение времени.

На третьем этапе для отдельного муниципального района требуется рассчитать суммарное количество выбросов по трем парниковым газам CO_2 , CH_4 , NO_x , учитывающих типы основных источников загрязнения. Этот анализ проводится при помощи программного обеспечения QGIS на основе открытой базы данных крупных источников выбросов Climate Trace. Сведения Climate Trace выгружаются в таблицу атрибутов по каждому из муниципальных районов с набором ввода данных: наименование границы административно-территориального деления (АДТ), основного фактора источника загрязнения и суммарное количество выбросов.

Четвертый этап представляет собой пространственное ГИС-моделирование. На базе информации атрибутов с помощью метода кластеризации данных составляется схема районов, наиболее подверженных изменению климата по градации цветов: от светлого к темному, соответственно от незначительного к наи-



Рис. 8. Этапы исследования выявления влияния антропогенных факторов на территорию

большему выбросу парниковых газов. Также на этом этапе полученной модели составляются предложения по адаптации территории, направленные на организацию мероприятий для снижения выбросов парниковых газов на территории исследования.

Разработанные этапы исследования позволят проанализировать влияние антропогенных факторов на изменение климата Арктической зоны Российской Федерации и подготовить рекомендации для смягчения его негативных последствий. Построенная схема анализа районирования даст возможность наглядно показать территории выбросов основных крупных источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации теоретических исследований была выбрана территория Республики Коми. Рассматриваемая территория расположена на северо-востоке европейской части России и входит в СЗФО (рис. 9). Согласно Постановлению Правительства РФ от 16.11.2021 № 1946 к районам Крайнего Севера Республики Коми относятся городские округа: Воркута, Инта, Усинск; муниципальные районы: Усть-Цилемский, Ижемский, Печора; к местностям, приравненным к районам Крайнего Севера: Сыктывкар, Ухта, Вуктыл; муниципальные районы: Княжпогостский, Койгородский, Корткеросский, Прилузский, Сыктывдинский, Сосногорск, Сысольский, Троицко-Печорский, Удорский, Усть-Вымский, Усть-Куломский [2].

Первый этап представляет собой сбор информации: метеорологических данных, количества осадков и климата отдельной точки, вызванных эффек-

том острова тепла. Географическое положение Республики Коми в относительно высоких широтах, удаленность ее от теплого Атлантического океана и близость обширного Азиатского континента обуславливают в республике умеренно-континентальный климат, значительно отличающийся от климата остальной территории Европы. Большая протяженность республики с севера на юг 785 км, с юго-запада на северо-восток 1275 км, с запада на восток 695 км, а также разнообразие физико-географических условий создают существенную разницу в климате отдельных ее районов.

С помощью геопространственной платформы спутниковых снимков Earth Engine Data Catalog продукта набора данных Terra Climate о ежемесячном климате и климатическом водном балансе для глобальных наземных поверхностей составлены схемы метеорологических данных территории Республики Коми за период 1991–2022 г. (рис. 10). Как и в других регионах Арктики, Республика Коми сталкивается с повышением среднегодовой температуры. За последние десятилетия установился тренд на увеличение температур в разных сезонах, особенно заметное в зимние месяцы.

Стандартизированная база данных по осадкам SPEIbase каталога данных Earth Engine составлена на основе схемы за промежуток 1991–2022 г. за временную шкалу SPEI в 12 месяцев. Отмечается рост годового количества осадков (рис. 11). В последние 30 лет температура увеличилась на 0,8–1,5 °C, в результате чего граница мерзлоты, залегающей с поверхности, отступила к северу на 30–50 км.

Климат отдельной точки определяется свойствами городской среды в ее окрестностях не толь-



Рис. 9. Республика Коми в системе расселения Российской Федерации (источник: QGIS и Adobe Illustrator)

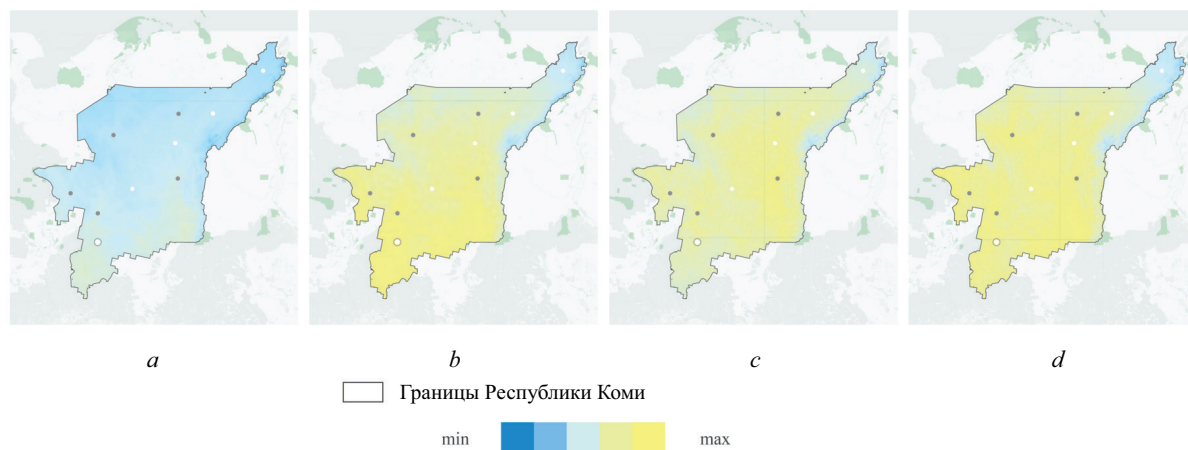


Рис. 10. Метеорологические данные территории Республики Коми: *a* — 1991 г.; *b* — 2000 г.; *c* — 2015 г.; *d* — 2022 г. (источник: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

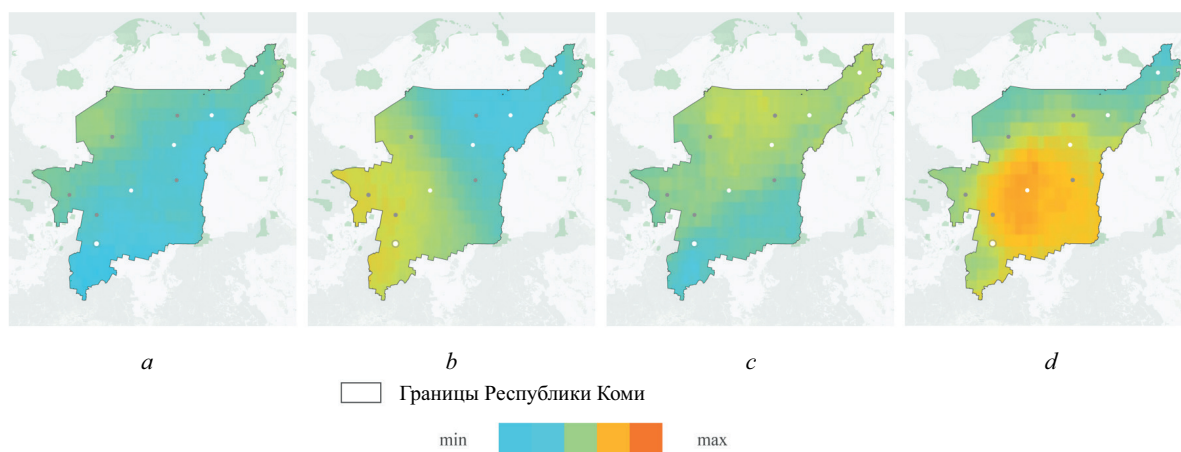


Рис. 11. Количество осадков на территории Республики Коми: *a* — 1991 г.; *b* — 2000 г.; *c* — 2015 г.; *d* — 2022 г. (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

ко на локальном масштабе (в радиусе первых сотен метров), но и на мезомасштабе (в радиусе до 10 км). Это связано с тем, что тепловые эффекты небольших однородных участков аккумулируются и переносятся воздушными потоками над городом. В результате формируется мезомасштабный остров тепла, который выражен наиболее ярко в центральных районах городов, но за счет атмосферного переноса может распространяться к окраинам мегаполиса и даже в пригороды. Эффект острова тепла имеет место быть и в Республике Коми, хотя масштаб его проявления может быть намного меньше по сравнению с большими городами.

С помощью набора данных Earth Engine о глобальных изменениях человека CSP gHM составлена схема совокупного показателя изменения человеком земной поверхности, который рассчитывается путем оценки доли измененного местоположения (пикселя). Республика Коми обладает низкой плотностью населения и по большей части состоит из природных ландшафтов, включая леса, равнины и различные водные ресурсы. Из-за этого в регионе не наблюдается

ярко выраженного эффекта острова тепла, который обычно возникает в городских районах с высокой плотностью застройки и использованием асфальтированных поверхностей (рис. 12).

Также была составлена схема искусственной засветки неба на основе спутниковых данных Light Pollution Map (World Atlas 2015). Исходя из рис. 13, можно сделать вывод, что засветку неба представляют собой не только населенные пункты.

На основе данных Light Pollution Map (World Atlas 2015) и каталога energybase нефтяных и газовых месторождений в программе Illustrator произведено наслаивание двух схем, исходя из чего можно сделать вывод, что засветка неба имеет географическую протяженность активных нефтяных месторождений, выявленных их электрическим светом, а также свет и тепло, выделяемые при сжигании природного газа (рис. 14). Горящий природный газ первоначально растворялся в сырой нефти и выходит из раствора во время производства. Буровые компании сжигают его на факеле, потому что газ неудобно или невыгодно использовать на буровой площадке, или потому что его

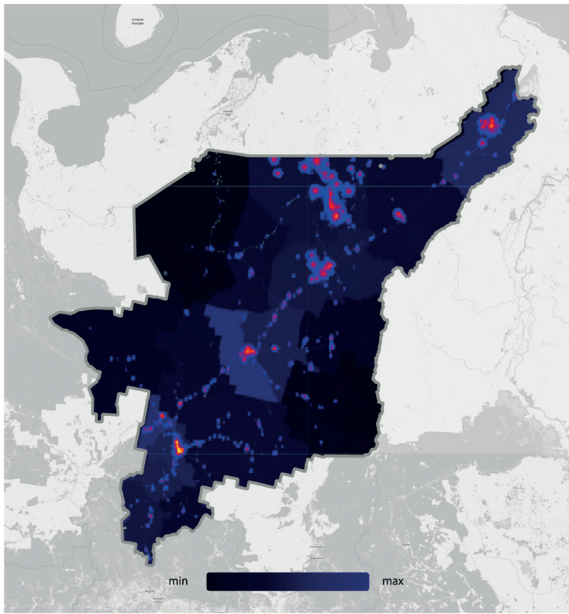


Рис. 12. Плотность и размещение населения Республики Коми (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

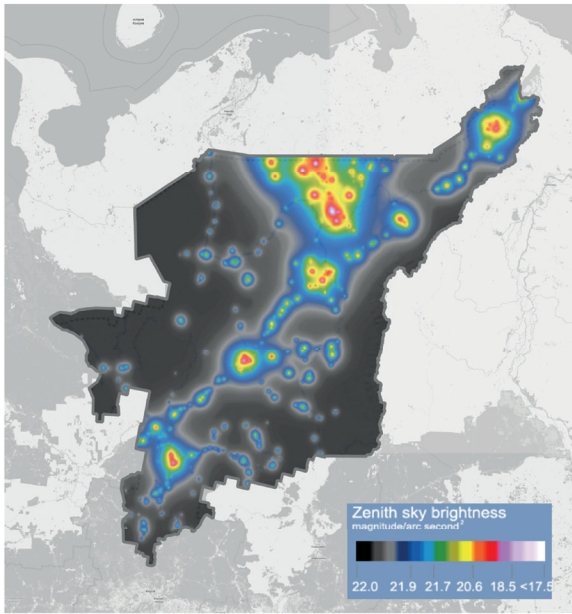
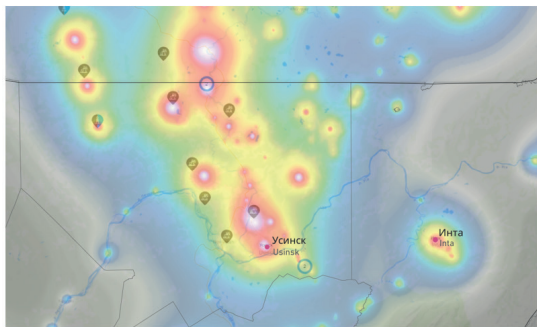
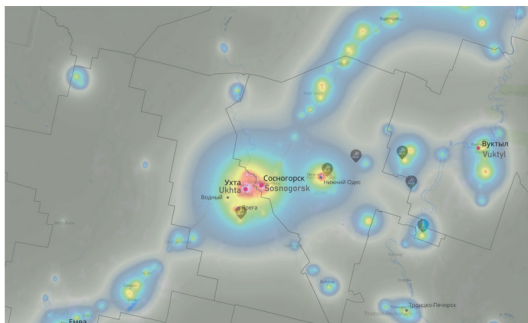


Рис. 13. Атлас искусственной засветки неба на основе спутниковых данных (источники: Light Pollution Map и Adobe Illustrator)



a



b

- Поселения

 - От 50 до 100 тыс. чел.
 - От 20 до 50 тыс. чел.
 - От 10 до 20 тыс. чел.
 - От 5 до 10 тыс. чел.
- Границы муниципальных районов
- Месторождения

Рис. 14. Засветка неба + месторождения на примере: *a* — Усинского района; *b* — Ухтинского района (источники: Light Pollution Map, energybase и Adobe Illustrator)

доставка на рынок обходится дорого. Эта практика производит большую вспышку горящего газа, который освещает окружающую область и выпускает высокую температуру и загрязнение в атмосферу.

На втором этапе с помощью данных материалов анализа территориальной схемы с отходами были составлены схемы мест накопления опасных отходов и выявлены несанкционированные места размещения отходов, расположенные на землях лесного фонда (рис. 15, 16). Среди 11 регионов СЗФО Республика Коми занимаем 5-е место по количеству образующихся отходов. Основной вклад в образование отходов, вредных как природе, так и человеку, вносят предприятия по добыче полезных ископаемых и обраба-

тывающие производства, так как Республика Коми является одной из крупнейших энергосырьевых баз на северо-западе России, в частности угля, дерева и нефти. Главные отрасли промышленности с высоким образованием отходов — угледобывающая (ОАО «Воркутауголь», ОАО «Шахта Интауголь»), нефтедобывающая (ОАО «Комнедра», ОАО «Северная нефть», ОАО «Енисей») и деревообрабатывающая (ОАО «Монди СППК»). В процентном соотношении этим предприятиям принадлежит образование 80 % отходов и области загрязнения не ограничиваются лишь землей. Отходы, не подлежащие использованию и переработке, направляются в места хранения и захоронения (рис. 17).

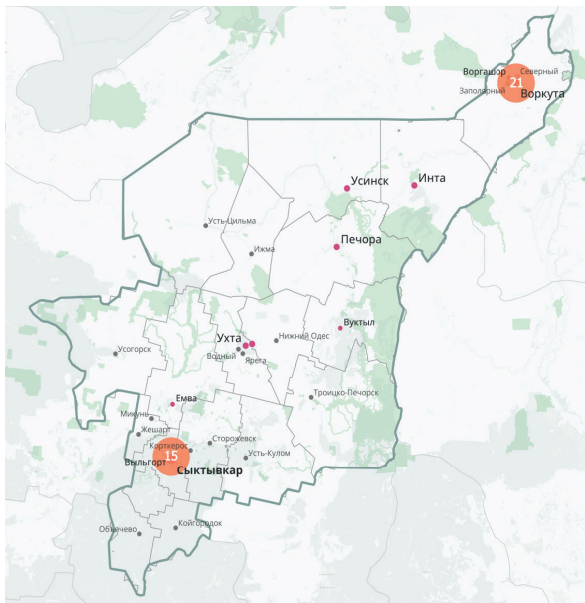


Рис. 15. Места накопления опасных отходов (источники: QGIS и Adobe Illustrator)

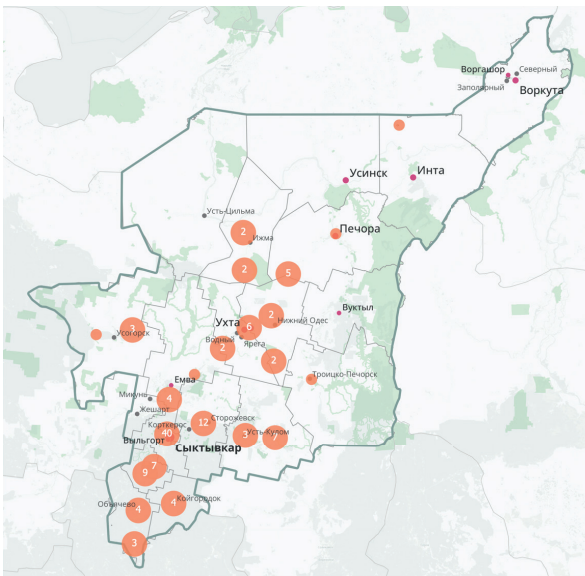


Рис. 16. Несанкционированные места размещения отходов, расположенных на землях лесного фонда (источники: Source: QGIS и Adobe Illustrator)

Также на основе данных QGIS выявлены места расположения основных источников техногенного воздействия: производства и месторождения полезных ископаемых (рис. 17). Для подсчета количества выбросов парниковых были выгружены данные Climate Trase, основанные на спутниках, методах дистанционного зондирования и обученном алгоритме искусственного интеллекта. Подробный обзор глобальных выбросов позволил определить местоположение крупных источников и оценить количественные оценки вы-

бросов в течение времени (рис. 18). Исходя из этого можно сделать вывод, что между показателями первого этапа исследования, местами накопления отходов, а также расположения источников техногенного воздействия и количества выбросов основных крупных (источник Climate Trase) проводится взаимосвязанный анализ объектов выбросов антропогенных факторов. Третьим этапом производится статистический анализ по выбросам парниковых газов на территории республики Коми, включая углекислый газ CO₂,

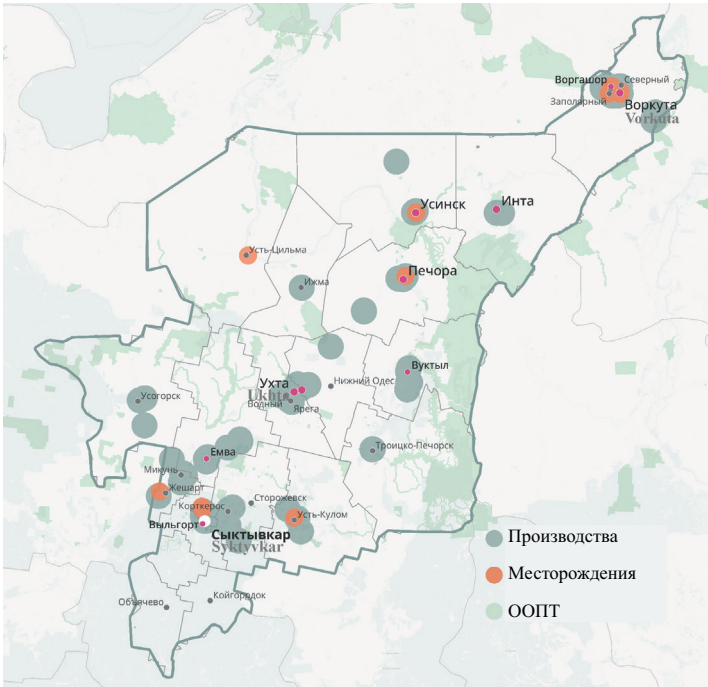


Рис. 17. Анализ расположения источников техногенного воздействия (источники: QGIS и Adobe Illustrator)

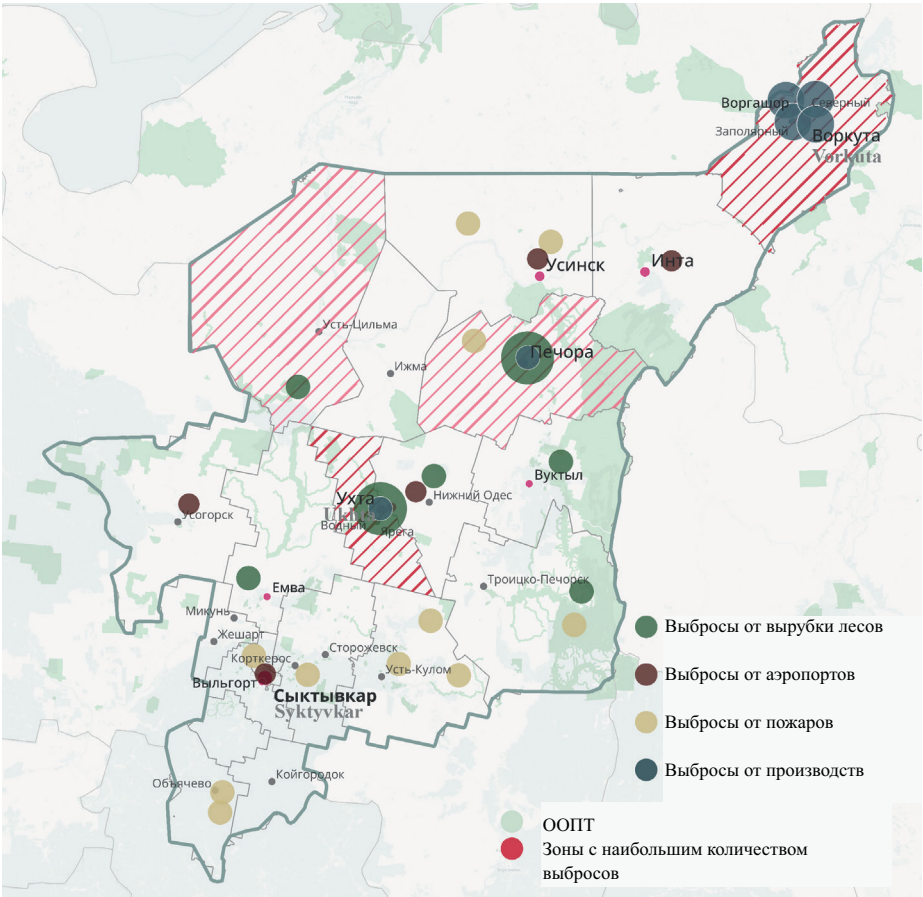


Рис. 18. Количество выбросов основных крупных источников (источники: Climate Trace и Adobe Illustrator)

оксиды азота NO_x и метан CH_4 , которые оказывают значительное влияние на окружающую среду и климат региона.

На основе информации Climate Trace составлена таблица атрибутов по трем парниковым газам с наименованием источника загрязнения и его расположением в пределах региона, а также суммарным количеством выбросов каждого из парниковых газов как по отдельному источнику загрязнения, так

и по району, и по всему региону Республики Коми. Из таблицы можно видеть, что наибольшее количество выбросов по трем парниковым газам приходится на территорию Арктической зоны Республики Коми.

На четвертом этапе составляется схема пространственного ГИС-моделирования на базе трех основных загрязняющих веществ: углекислый газ CO_2 , оксиды азота NO_x и метан CH_4 с учетом степени их влияния на здоровье человека и окружающую среду. Данные

Количество выбросов загрязняющих веществ Source: ClimateTrace и Microsoft Excel

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO_2	CH_4	NO_2	CO_2e
		т			
Городской округ Сыктывкар	Аэропорт (внутренний)	34 391,6	0,24	0,96	34 392,8
	Аэропорт (зарубежный)	1344,79	0,01	0,04	1344,84
	Автомобильный транспорт	72 867,7	2,39	1,88	72 871,97
	Электростанция	2 175 000	—	—	2 175 000
	Полигон ТБО	—	3128,02	—	3128,02
	Бытовые и производственные отходы (сточные воды)	—	61,08	39,43	100,51
	Итого	2 283 604,09	3191,74	42,31	2 286 838,14
Сыктывдинский район	Автомобильный транспорт	11 017	0,36	0,28	11 017,64
	Итого	11 017	0,36	0,28	11 017,64

Продолжение табл.

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO _{2e}
		т			
Городской округ Воркута	Аэропорт	1190,59	0,01	0,03	1190,63
	Воргашорская угольная шахта	–	61 303,5	–	61 303,5
	Комсомольская угольная шахта	–	24 403,8	–	24 403,8
	Заполярная угольная шахта	–	29 799,1	–	29 799,1
	Воркутинская угольная шахта	–	31 210,4	–	31 210,4
	Юньягинская угольная шахта	–	1099,78	–	1099,78
	Воркутинская электростанция	659 000	–	–	659 000
	Итого	660 190,59	147 816,59	0,03	808 007,21
Городской округ Ухта	Аэропорт (внутренний)	15 491,7	0,11	0,43	15 492,24
	Аэропорт (зарубежный)	51,04	–	–	51,04
	Ухтинский НПЗ	443 825	60,68	6,19	443 891,87
	Полигон ТБО	–	6192,58	–	6192,58
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	24,84	15,86	40,7
	Итого	459 367,74	6278,21	22,48	465 668,43
Городской округ Инта	Аэропорт	27,05	–	–	27,05
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	5,38	3,47	8,85
	Итого	27,05	5,38	3,47	35,9
Городской округ Усинск	Аэропорт	8538,92	0,06	0,24	8539,22
	Месторождение нефти и–газа	1 010 970	19 093,7	–	1 030 063,7
	Электростанция	286 000	–	–	286 000
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	4,99	–	4,99
	Итого	1 305 508,92	19 098,75	0,24	1 324 607,91
Городской округ Вуктыл	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,32	0,85	2,17
	Итого	0	1,32	0,85	2,17
МР Сосногорск	Электростанция	825 000	–	–	825 000
	Итого	825 000	0	0	825 000
Княжпогостский район	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	2,25	–	2,25
	Итого	0	2,25	0	2,25
МР Печора	Аэропорт	596,43	–	0,02	596,45
	Электростанция	2 429 000	–	–	2 429 000
	Места захоронения	–	3767,91	–	3767,91
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	5,39	3,48	8,87
	Итого	2 429 596,43	3773,3	3,5	2 433 373,23
Усть-Цилемский район	Аэропорт	581,74	–	0,02	581,76
	Итого	581,74	0	0,02	581,76
Ижемский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Удорский МР	Средне-Тиманский	276 633	–	–	276 633
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,24	0,81	2,05
	Итого	276 633	1,24	0,81	276 635,05
Сысольский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Троицко-Печорский район	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,19	0,77	1,96
	Итого	0	1,19	0,77	1,96

Окончание табл.

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		Т			
Корткеросский район	–	1533,45	2,73	0,07	1536,25
	Итого	1533,45	2,73	0,07	1536,25
Усть-Вымский район	Полигон ТБО	–	14 233,3	–	14 233,3
	Итого	0	14 233,3	0	14 233,3
Усть-Куломский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Прилузский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Койгородский район	Полигон ТБО	–	7122,65	–	7122,65
	Итого	0	7122,65	0	7122,65
Итого суммарное по региону		8 253 060,01	201 529,01	74,83	8 454 663,85

таблицы атрибутов по суммарным показателям выбросов парниковых газов по каждому из районов Республики Коми были внесены в программу QGIS. Методом кластеризации созданы пять уровней показателей легенды количества антропогенных выбросов для окрашивания районов Республики Коми от светлого к темному, где светлый — это минимальное количество загрязняющих веществ, а темный — выбросы более 1 млн т. Проанализировав количество выбросов

от каждого из источников антропогенного воздействия, была составлена экологическая схема опасности для 20 районов Республики Коми. Данная модель позволяет наглядно увидеть наибольшее количество выбросов в Печорском и Усинском районах, которые находятся на территории Крайнего Севера Республики Коми (рис. 19).
Для повышения жизнестойкости городов Республики Коми в условиях глобального потепления не-

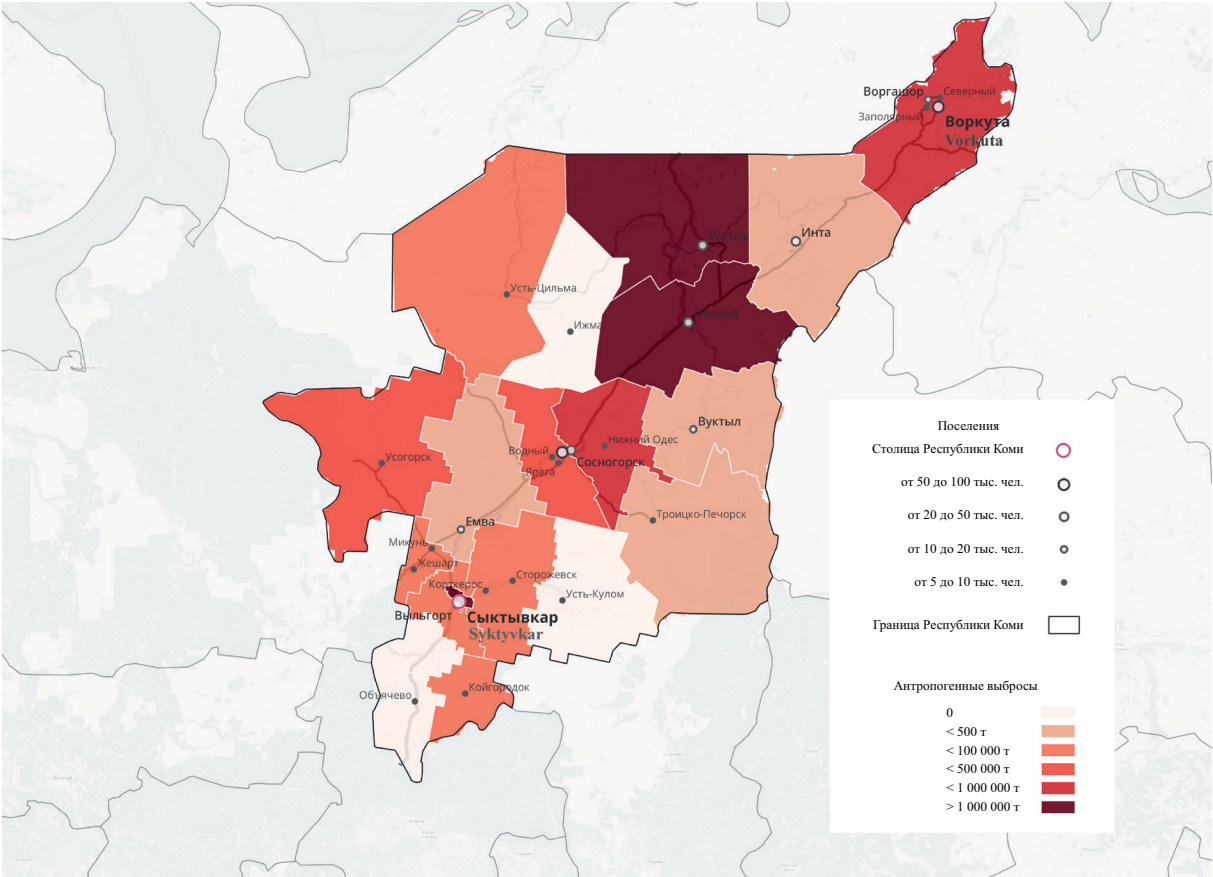


Рис. 19. Районы, наиболее подверженные изменению климата районирования региона Республики Коми, подготовлен в программе QGIS на материалах Climate Trace

обходимо разработать и внедрить планы адаптации к изменению климата. Эти планы должны включать обновление инфраструктуры и жилищного фонда, улучшение систем предупреждения и готовности к чрезвычайным ситуациям, а также содействие устойчивому развитию и использованию возобновляемых энергетических ресурсов. Рост уровня морей и изменение климатических условий могут привести к повреждению и разрушению инфраструктуры и жилищного сектора городов.

Можно выделить несколько видов негативных воздействий на окружающую среду в ходе обустройства месторождений:

- на атмосферу, выбросы при сжигании продукта;
- на водно-биологические ресурсы, сброс сточных вод, уничтожение фауны при строительстве водных переходов.

Парижское соглашение 2015 г. признает, что изменение климата является реальным и беспрецедентным вызовом, требующим срочных действий во всем мире, и определяет такие усилия по снижению, как вклад в «удержание роста среднемировой температуры намного ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5 °С, признавая, что это значительно сократит риски и последствия изменения климата».

В 2022 г. одним из приоритетных направлений нефтегазовых компаний по устойчивому развитию стала экологическая повестка. Нефтегазовые предприятия разрабатывают и внедряют решения для оптимизации промышленной деятельности предприятий, чтобы достичь целей по сокращению выбросов. Среди способов перехода нефтегазовых компаний

в область «зеленых» инноваций можно отметить следующие направления:

1. Внедрение возобновляемых источников энергии — солнечная и ветровая электроэнергетика.
2. Создание и распространение биотоплива.
3. Контроль и снижение удельных углеродных выбросов в разведке и добыче: внедрение инновационных технологий (БПЛА, сканирование, ультразвуковые детекторы).
4. Снижение углеродного следа: улавливание, использование и хранение углерода CCUS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение климата — одна из самых актуальных и серьезных проблем, которые непосредственно влияют на нашу планету и все ее экосистемы. Это глобальное явление затрагивает все регионы мира, включая Россию и Арктическую зону, в которую входит и Республика Коми.

Поэтапное исследование дало возможность проанализировать влияние антропогенных факторов на изменение климата Арктической зоны Российской Федерации и смоделировать схему анализа районирования, позволяющую наглядно показать территории выбросов основных крупных источников загрязнения.

Применение экологических технологий и инженерных решений в нефтегазовой промышленности имеет ряд практических применений, направленных на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Некоторые из таких решений включают в себя применение современных методов очистки, внедрение новых технологий и средств для снижения выбросов парниковых газов в атмосферу при процессах добычи и переработки нефти и газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононова Н.К. Изменение характера циркуляции атмосферы в последние десятилетия как фактор изменения климатических и ледовых условий Арктики // Материалы гляциологических исследований. 2006. № 100. С. 191–199. EDN PBFYVN.

2. Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л. Вероятностные оценки изменения прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 2. С. 140–158. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-140-158. EDN CYOUGW.

3. Болотова Н.Л. Особенности регионального сценария изменения климата Северной территории на примере Вологодской области // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию

кафедры общего землеведения и гидрометеорологии Белорусского государственного университета. 2023. С. 422–429. EDN GZYQOV.

4. Манаева И.В. Анализ взаимосвязи экономики и климата в городах России // Экономика региона. 2022. Т. 18. № 3. С. 837–851. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-3-15. EDN XZOHKK.

5. Бексултанова А.И. Роль России в решении проблемы изменения климата // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92–4. С. 64–65. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-173. EDN KBWVHW.

6. Сидоренкова А.В. Влияние изменения климата на биоразнообразие // Аллея науки. 2022. Т. 1. № 1 (64). С. 197–202. EDN YFEWYI.

7. Wurihan, Sainbuyan Bayarsaikhan, Bao Yuhai, Tong Siqin, Jin Hugejiletu, Yang Xueliang. Spatiotemporal variations of vegetation change and its response to cli-

mate change in Mongolia during 1982-2015 // *Nature of Inner Asia*. 2022. No. 2–3 (21). Pp. 37–51. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51. EDN GFCYFL.

8. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Иванов Н.Е. Особенности климата Арктики в 2021 году // *Российские полярные исследования*. 2022. № 1 (47). С. 7–10. EDN ZJPQVQ.

9. Overland J., Wang M., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M. et al. The urgency of Arctic change // *Polar Science*. 2019. Vol. 21. Pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008. EDN XPVNO.

10. Park T., Hashimoto H., Wang W., Thrasher B., Michaelis A.R., Lee T. et al. What does global land climate look like at 2 °C warming? // *Earth's Future*. 2023. Vol. 11. Issue 5. DOI: 10.1029/2022ef003330. EDN EXKDXH.

11. Гусев А.П. Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI) // *Региональные геосистемы*. 2023. Т. 47. № 4. С. 580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592. EDN XKYZTS.

12. Alvarez J., Yumashev D., Whiteman G. A framework for assessing the economic impacts of Arctic change // *Ambio*. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 407–418. DOI: 10.1007/s13280-019-01211-z. EDN WONNOV.

13. Ritchie H., Rosado P., Roser M. CO₂ and greenhouse gas emissions // *Our World in Data*. 2023.

14. Токтомышев С.Ж., Орозалиев М.Д., Жумабаева А.А., Абдылдаев А.С., Жумабеков А.А. Об озоновом слое и изменении климата атмосферы // *Материаловедение*. 2015. № 1 (15). С. 52–58. EDN RONRWX.

15. Бондаренко Л.В., Маслова О.В., Белкина А.В., Сухарева К.В. Глобальное изменение климата и его последствия // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2018. № 2 (98). С. 84–93. EDN YWMJMQ.

16. Кошкина А.С. Динамика климатических изменений на территории северо-западной Сибири и ее связь с изменениями циркуляции атмосферы // *Земля и Человек*. Актуальные вопросы современного

состояния окружающей среды : сб. ст. Межвузовской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. празднованию 90-летия Российского государственного гидрометеорологического университета. 2020. С. 47–51. EDN MVVXSA.

17. Сыромятина М.В., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Тенденции изменения климата на Алтае на фоне глобальных климатических изменений (по инструментальным и дендрохронологическим данным) // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2010. № 3. С. 82–91. EDN MVZETX.

18. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю., Пердери А., Мельникова М., Залюбовский Е. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. М. : Московская школа управления СКОЛКОВО, 2020.

19. Снакин В.В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность // *Жизнь Земли*. 2019. Т. 41. № 2. С. 148–164. EDN VQBPAP.

20. Yumashev D., Hope C., Schaefer K., Riemann-Campe K., Iglesias-Suarez F., Jafarov E. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-019-09863-x. EDN EQVLIG.

21. Vavrus S.J. The influence of Arctic amplification on mid-latitude weather and climate // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4. Issue 3. Pp. 238–249. DOI: 10.1007/s40641-018-0105-2. EDN YJJQIH.

22. Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko K., Sutyryna E. Circulation factors in climate change in the Baikal region // *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019. P. 14. DOI: 10.1117/12.2538282

23. Куделькин Н.С. Арктика и глобальное потепление: адаптация к изменению климата и охрана окружающей среды // *Юридические исследования*. 2022. № 1. С. 1–16. DOI: 10.25136/2409-7136.2022.1.37049. EDN KNUXCH.

Поступила в редакцию 27 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 16 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Евгеньевна Коробейникова — кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 908166, Scopus: 57209303653, ResearcherID: AAC-8979-2022, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Алина Андреевна Сокольников — магистр кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 58565130700, ORCID: 0009-0000-2014-4333; sokolnikova99@mail.ru.

Вклад авторов:

Коробейникова А.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы, доработка текста, научное редактирование текста.

Сокольников А.А. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Global warming, primarily linked to anthropogenic greenhouse gas emissions, has been a worldwide trend over recent decades. Climate change is corroborated by the CMIP global climate models, which form the basis for contemporary analysis of climate change. CMIP data, particularly the latest findings from the CMIP6 model, are critical for developing projections and assessing the impacts of climate change. However, despite advances in climate modelling, there is currently a shortage of specialized urban planning methodologies for assessing the impacts of climate change in cities and regions.

One of the most telling indicators of climate change is air temperature. The average annual temperature over land rose by 0.179 °C per decade between 1976 and 2020 [1–3]. To support this argument, the authors have produced graphs showing temperature trends based on data obtained from the Earth Engine Data Catalogue over the last three decades (Fig. 1).

Russia is the only country where the Arctic boundary is enshrined in law, and the Arctic Zone of the Russian Federation (AZRF) has been designated by a decree of the President of the Russian Federation. The AZRF covers nine regions: four fall entirely within it — the Murmansk Oblast, the Nenets Autonomous Okrug (hereinafter “NAO”), the Chukotka NAO and the Yamalo-Nenets NAO; five fall partially within it — the Republic of Komi, the Republic of Karelia, the Republic of Sakha (Yakutia), the Arkhangelsk Oblast and the Krasnoyarsk Krai.

The four sub-Arctic regions comprise: the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Kamchatka Krai and Magadan Oblast. The Arctic territories cover an area of 4.8 million km² (28 % of the country’s territory). They are home to 2.6 million people, more than half the population of the global Arctic.

Based on information from the Russian statistical yearbooks published by the Federal State Statistics Service, an analysis was carried out of average monthly air temperatures and precipitation levels across the regions of the Russian Federation. In 2020, there was a sharp rise in CH₄, which may indicate the most significant temperature increase recorded across the entire territory of the Arctic Zone of the Russian Federation:

- the average observed temperature in January was –16.5 °C, with a deviation from the norm of 6.4 °C. The greatest deviation from the norm in 2020 was observed in the North-West Federal District (NWFD), at 6.8 °C (Fig. 2, a);
- the average observed temperature in July was 14.7 °C, with a deviation from the norm of 1.3 °C (Fig. 2, b). The greatest deviation from the norm was also observed in the NWFO, amounting to 2.1 °C;
- the average monthly precipitation in July 2003 was 69.5 mm, and in 2020 it was 62.3 mm (Fig. 2, c);
- comparing the graphs of average monthly precipitation by region in the North-West Federal District, it can be concluded that precipitation is directly proportional to air temperature: the warmer the air temperature, the greater

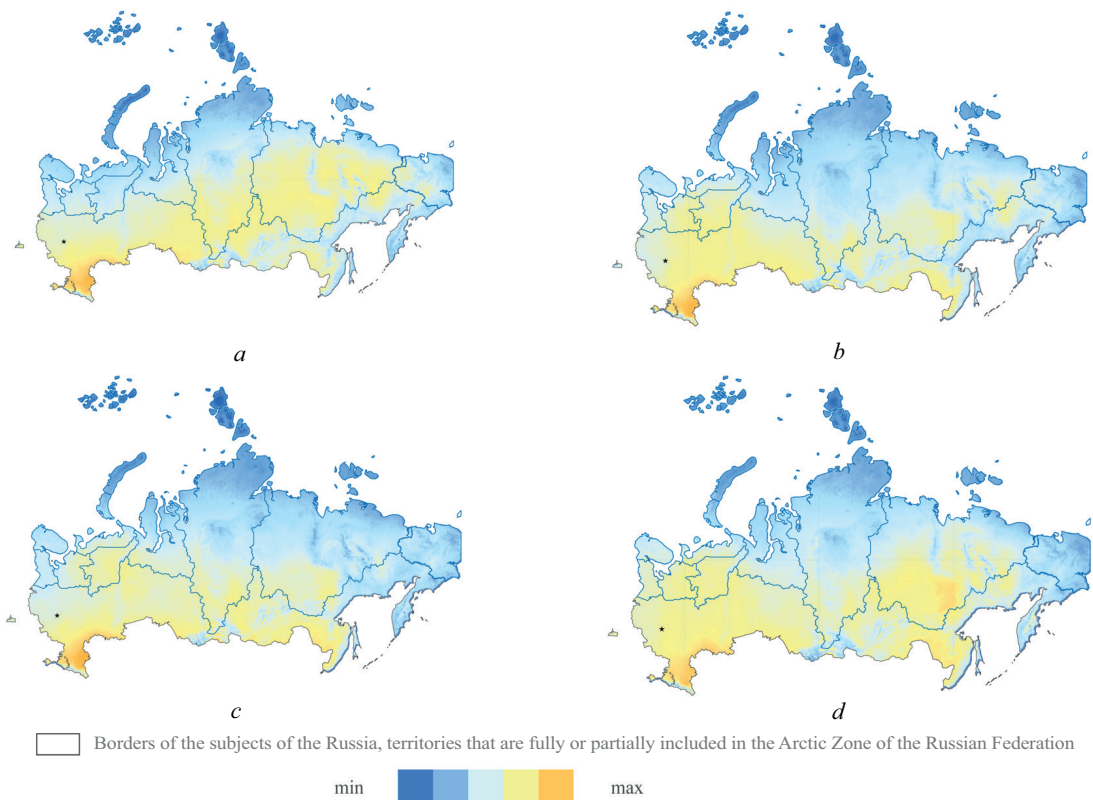


Fig. 1. Meteorological data for the Russian Federation: a — 1991; b — 2000; c — 2015; d — 2022 (based on information from the Earth Engine Data Catalogue)

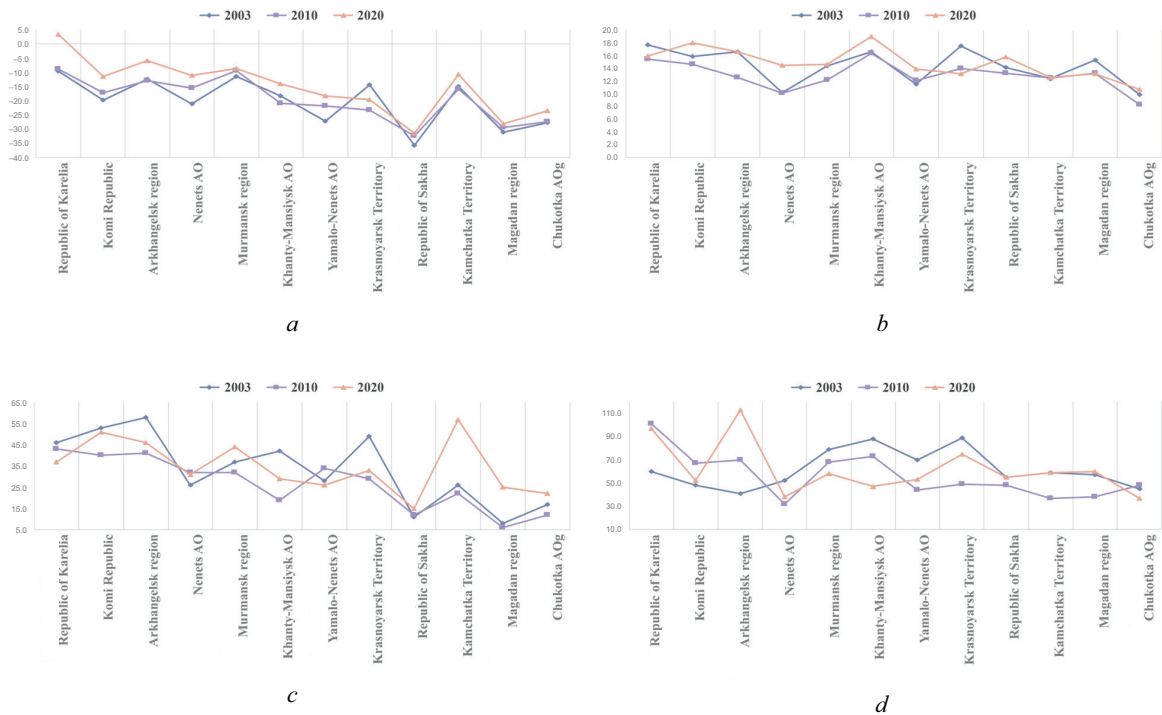


Fig. 2. Average monthly values for the regions of the AZRF: *a* — average monthly air temperature (January); *b* — average monthly air temperature (July); *c* — average monthly precipitation (January); *d* — average monthly precipitation (July) (Russian statistical yearbooks published by the Federal State Statistics Service and Microsoft Excel)

the amount of precipitation falling to the Earth’s surface (Fig. 2).

An analysis of changes in temperature and precipitation between 2003 and 2022 suggests that the accelerated retreat of glaciers during this period is due to a 1.5 °C rise in summer air temperatures since the start of the 21st century, and primarily affects the North-West Federal District. The consequences of global warming are being felt not only in the Arctic region, but also far beyond its borders [4–6].

Greenhouse gas concentrations began to rise rapidly following the resumption of industrial production in the country in 1926 and continued to do so until 1990 (Fig. 3). One of the most significant greenhouse gases is carbon dioxide; gases such as methane and nitrous oxide also contribute to global warming [7–9]. Fig. 3 shows

the total emissions of these three greenhouse gases. The graphs, based on data from OurWorldinData.org, highlight the period 1930–1990, during which a sustained rise in greenhouse gas levels was observed (Fig. 3, 4).

According to data from Roshydromet, the rise in greenhouse gas concentrations across Russia in 2022 reached record levels, primarily for carbon dioxide CO₂ and methane CH₄. Carbon dioxide concentrations across the Russian Federation in 2022 are rising compared with 2020 and 2021 (Fig. 3).

The second most significant cause of global warming after carbon dioxide is methane CH₄ — a colourless, odourless gas. Since 1750, humans have increased the amount of methane in the atmosphere by approximately 150 %. The extraction of fossil fuels, such as oil, gas and coal, is the largest source of methane emissions.

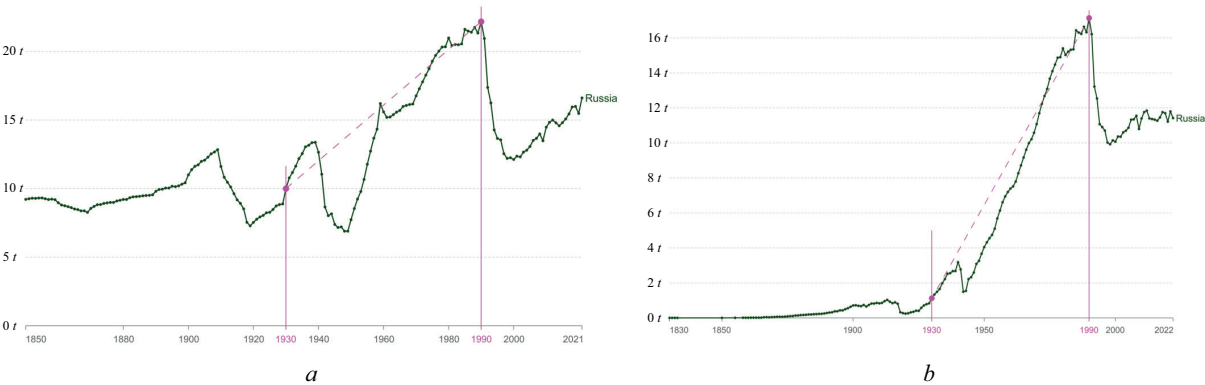


Fig. 3. CO₂e greenhouse gas emissions by category (*a*); per capita CO₂ emissions (*b*) (sources: OurWorldinData.org and Adobe Illustrator)

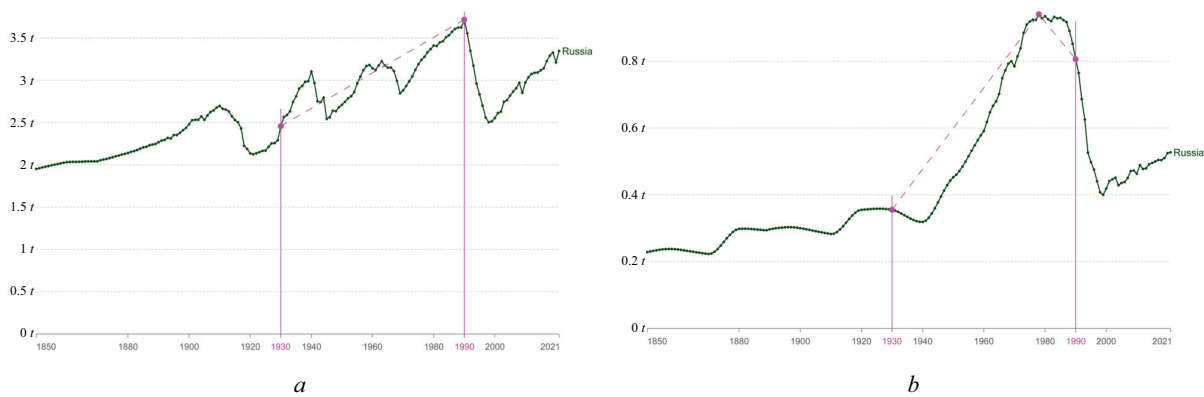


Fig. 4. Per capita greenhouse gas emissions: *a* — CH_4 ; *b* — NO_x (sources: OurWorldinData.org and Adobe Illustrator [13])

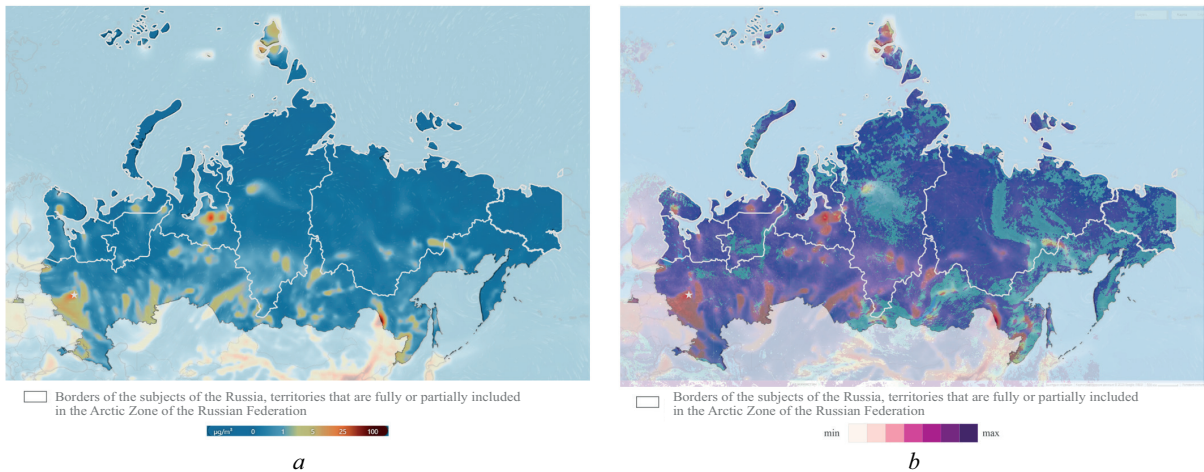


Fig. 5. Concentrations of natural gases within the Russian Federation: *a* — NO_x ; *b* — $\text{NO}_x + \text{CH}_4$ (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

Humans have also increased methane emissions through intensive farming practices, livestock rearing and waste disposal [10, 11].

Greenhouse gases such as methane remain in the Earth's atmosphere, allowing sunlight to pass through but trapping heat [12, 13]. One recent study showed that a rapid reduction in methane emissions could slow the rate of global warming by 30 %. In 2020, the average annual per capita concentration of methane was 3.21 tonnes, followed by a surge to 3.35 tonnes in 2021 (Fig. 4, *a*).

Growing demand from agriculture, transport, industry and the energy sector has led to a sharp rise in nitrogen pollution levels and associated greenhouse gas emissions [14]. Nitrogen oxide NO_x emissions from industry and combustion, for example, are 300 times more potent than CO_2 as a greenhouse gas (Fig. 4, *b*).

Methane and other hydrocarbons in natural gas combine with nitrogen oxides to form atmospheric ozone pollution (Fig. 5) [15, 16]. Across much of the country, the duration of snow cover continues to decrease, whilst the maximum winter snow depth is increasing across most of the country. As the permafrost, which covers 63 % of Russia's territory, thaws, greenhouse gases accumulated in the frozen organic matter are released, in particular carbon dioxide CO_2 and methane CH_4 , which has

a more potent impact on the climate [17–19]. The permafrost zone is being actively developed due to its mineral reserves, but the impact of temperature changes is having serious consequences for the infrastructure of the northern regions, which will adversely affect buildings and subsequently lead to their collapse [20, 21].

The rise in greenhouse gas concentrations and the current global warming across the entire globe are directly linked to the problem of human impact [22, 23]. Human economic activity — the use of natural resources, a significant reduction in forest cover, a failure to replenish it, and, as a result, the waterlogging of land, and the expansion of industrial and urban areas — all contribute to an increase in greenhouse gas concentrations and thereby intensify the greenhouse effect, leading to a rise in the average annual temperature of the lower atmosphere.

MATERIALS AND METHODS

Anthropogenic factors are a set of factors directly or indirectly linked to human activity that influence changes in and the functioning of the environment. The main driver of current global warming is the continuing rise in concentrations of CO_2 , CH_4 and nitrogen oxides NO_x (Fig. 6).

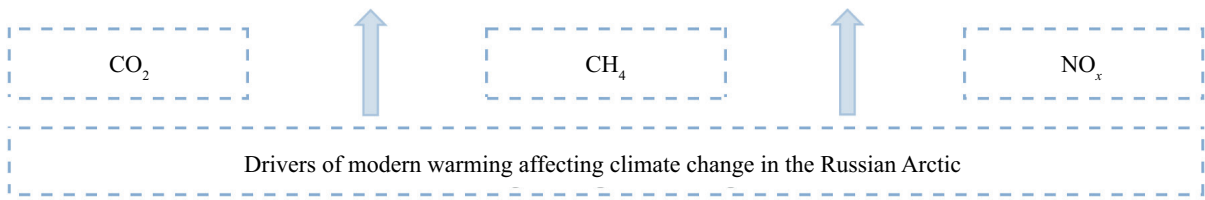


Fig. 6. The main drivers of current global warming

The classification of key anthropogenic sources of greenhouse gas emissions can be based on various criteria, such as the type of activity, scale, or whether they are direct or indirect sources:

- 1) direct sources:
 - power stations (particularly those using fossil fuels);
 - coal mines (methane emissions during extraction);
 - landfill sites (methane from the decomposition of organic waste);
 - manufacturing (depending on the sector; many manufacturing processes emit CO₂ and other gases);
- 2) indirect sources:
 - road transport (emissions from fuel combustion);
 - airports (including emissions from both aircraft and associated infrastructure);
 - heat island effect (not a source in the strict sense, but contributes to higher temperatures and, consequently, increased energy consumption);
- 3) household and industrial waste:
 - may be a source of both direct and indirect emissions, depending on how the waste is managed and processed.

The impact of anthropogenic factors on environmental climate change:

- rising temperatures;
- changes in precipitation;
- rising water levels;
- changes to ecosystems.

Based on the classification of the main anthropogenic factors, a theoretical model of the impact of anthropogenic pressure on climate change has been developed (Fig. 7).

To analyze the study area in terms of greenhouse gas emissions, the region must be broken down into its constituent parts; in our case, by municipal districts. The tools used to model the areas most vulnerable to climate change are:

- spatial GIS modelling, which enables the analysis of spatial data, including the distribution of gas emissions across the territory;
- analytical methods are used to identify patterns and trends in climate and emissions data;
- statistical analysis of data makes it possible to assess the extent to which various factors influence greenhouse gas emissions;
- mapping.

The study comprises four key stages, as shown in Fig. 8.

The first stage involves gathering information on climate change in the region over recent decades: meteorological data, precipitation levels, and the climate at specific locations affected by the urban heat island (UHI) effect.

In the second stage, cartographic analysis is used to identify the locations of the most hazardous waste, which also affects biodiversity. The locations of the main sources of anthropogenic impact are also determined, and Climate Trace data is extracted to establish the locations of major sources and assess quantitative emissions over time.

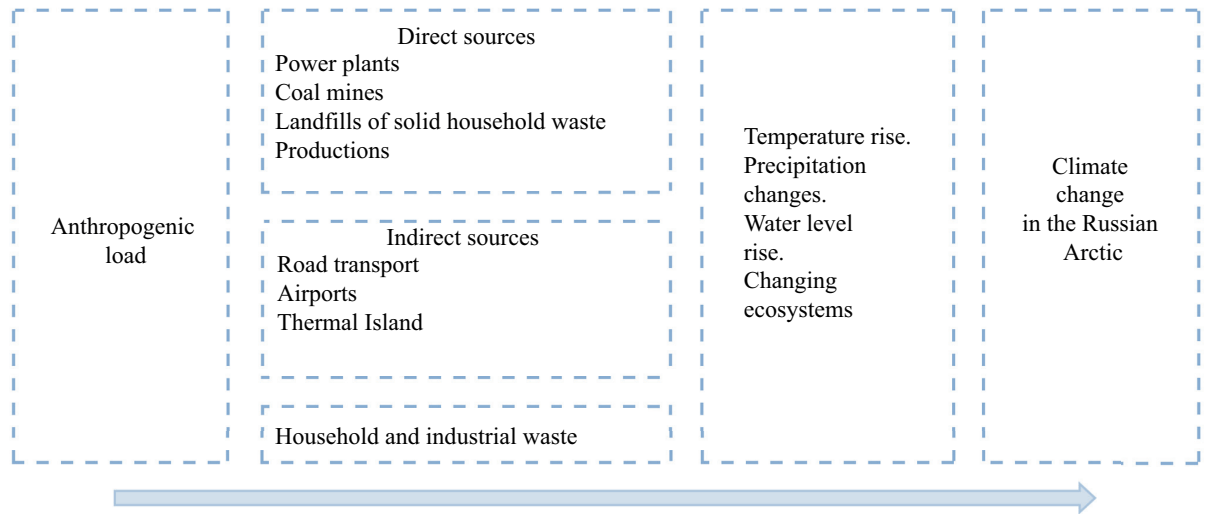


Fig. 7. A theoretical model of the impact of human activity on climate change

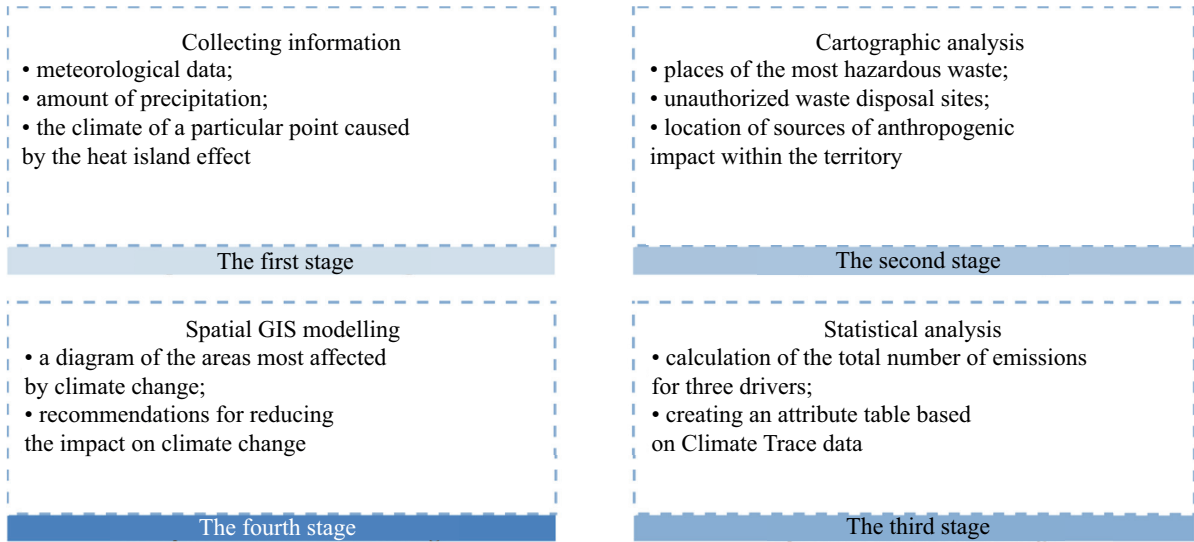


Fig. 8. Stages of the study to identify the impact of anthropogenic factors on the area

In the third stage, for each individual municipal district, the total emissions of the three greenhouse gases — CO_2 , CH_4 , NO_x — must be calculated, taking into account the types of major pollution sources. This analysis is carried out using QGIS software, based on the open-access Climate Trace database of major emission sources. Data from Climate Trace is exported into an attribute table for each municipal district, containing the following data fields: the name of the administrative-territorial division (ATD), the main pollution source factor, and the total emissions.

The fourth stage involves spatial GIS modelling. Based on the attribute data, a map of the areas most vulnerable to climate change is compiled using a data clustering method, with a colour gradient ranging from light to dark, corresponding to greenhouse gas emissions ranging from negligible to the highest levels. At this stage, proposals for regional adaptation are also drawn up based on the resulting model, aimed at organizing measures to reduce greenhouse gas emissions within the study area.

The research stages outlined will enable an analysis of the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic region of the Russian Federation and the formulation of recommendations to mitigate its negative consequences. The zoning analysis framework developed will make it possible to clearly identify the areas where emissions from the main major sources occur.

RESEARCH RESULTS

The territory of the Komi Republic was selected for the validation of theoretical research. The area under consideration is situated in the north-east of the European part of Russia and forms part of the North-West Federal District (Fig. 9). According to Resolution No. 1946 of the Government of the Russian Federation dated 16 November 2021, the urban districts of Vorkuta, Inta and Usinsk, as well as the municipal districts of Ust-Tsilemsky, Izhemsky and Pechora, are classified as Far

North regions of the Komi Republic; the following localities are classified as equivalent to Far North regions: Syktyvkar, Ukhta, Vuktyl; and the municipal districts of Knyazhpogostsky, Koygorodsky, Kortkerossky, Pri-luzsky, Syktyvdinsky, Sosnogorsk, Sysolsky, Troitsko-Pechorsky, Udorsky, Ust-Vymsky and Ust-Kulomsky [2].

The first stage involves gathering information: meteorological data, precipitation levels and the climate of a specific location affected by the heat island effect. The Republic of Komi’s geographical location at relatively high latitudes, its distance from the warm Atlantic Ocean and its proximity to the vast Asian continent result in a temperate continental climate, which differs significantly from that of the rest of Europe. The republic’s considerable extent — 785 km from north to south, 1,275 km from south-west to north-east and 695 km from west to east — as well as the diversity of its physical and geographical conditions, result in significant differences in the climate of its individual regions.

Using the Earth Engine Data Catalog geospatial platform for satellite imagery, specifically the Terra Climate dataset on monthly climate and climatic water balance for global land surfaces, meteorological data maps of the Komi Republic were compiled for the period 1991–2022 (Fig. 10). As in other Arctic regions, the Komi Republic is experiencing a rise in average annual temperature. Over recent decades, a trend towards rising temperatures across the different seasons has become established, which is particularly noticeable during the winter months.

The standardized SPEIbase precipitation database in the Earth Engine data catalogue is compiled on the basis of the scheme covering the period 1991–2022, using the 12-month SPEI time scale. An increase in annual precipitation is observed (Fig. 11). Over the last 30 years, temperatures have risen by 0.8–1.5 °C, causing the boundary of the permafrost layer lying just below the surface to retreat northwards by 30–50 km.

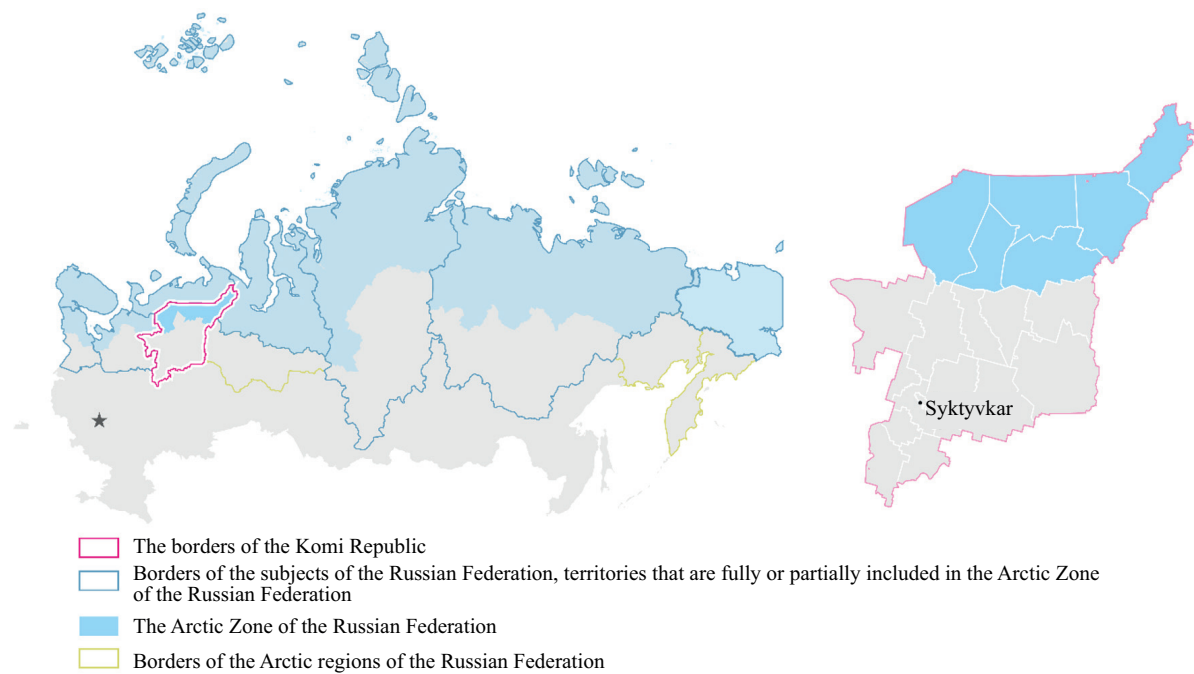


Fig. 9. The Komi Republic within the settlement pattern of the Russian Federation (source: QGIS and Adobe Illustrator)

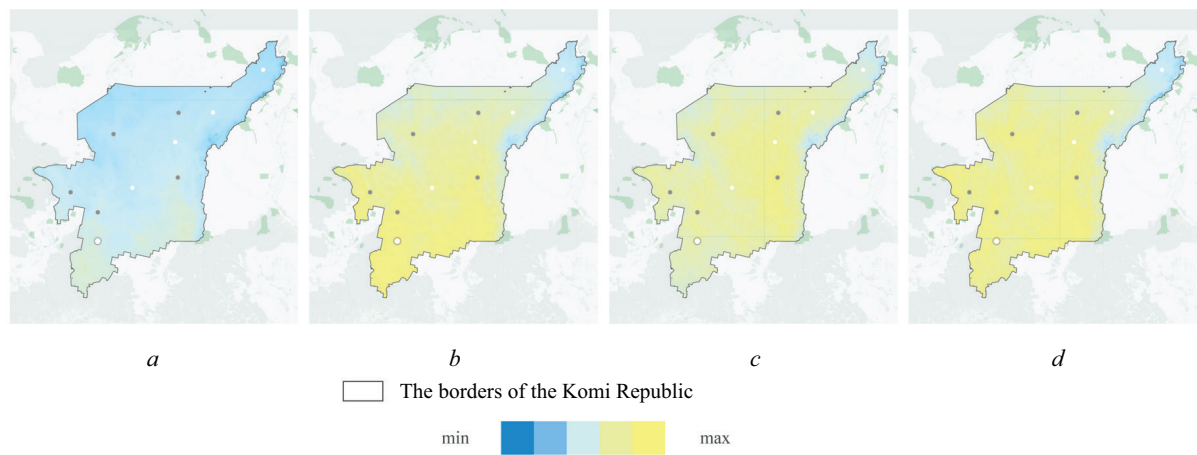


Fig. 10. Meteorological data for the Komi Republic: *a* — 1991; *b* — 2000; *c* — 2015; *d* — 2022 (source: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

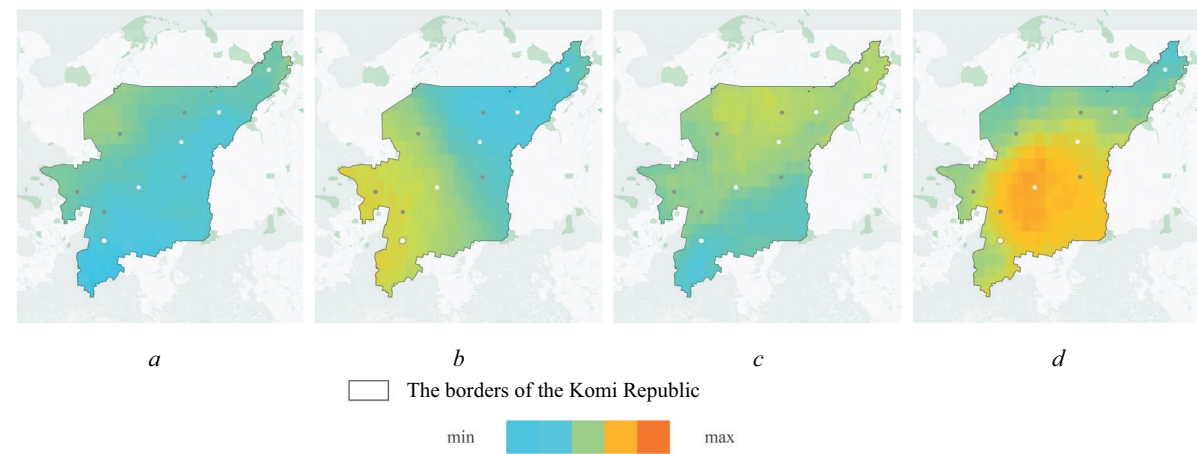


Fig. 11. Precipitation in the Komi Republic: *a* — 1991; *b* — 2000; *c* — 2015; *d* — 2022 (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

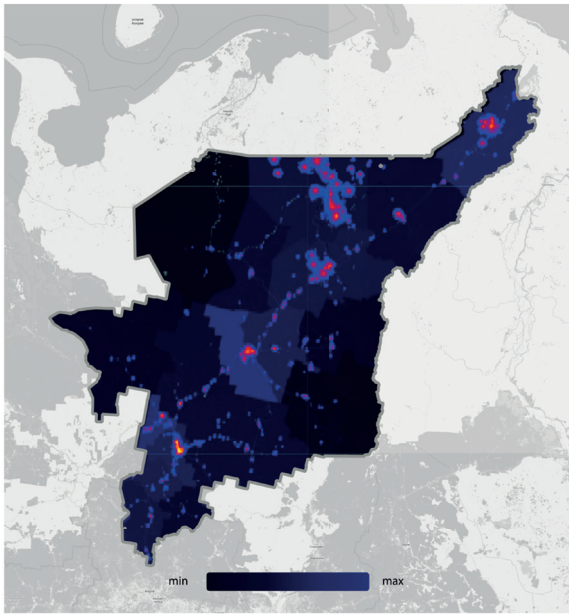


Fig. 12. Population density and distribution in the Komi Republic (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

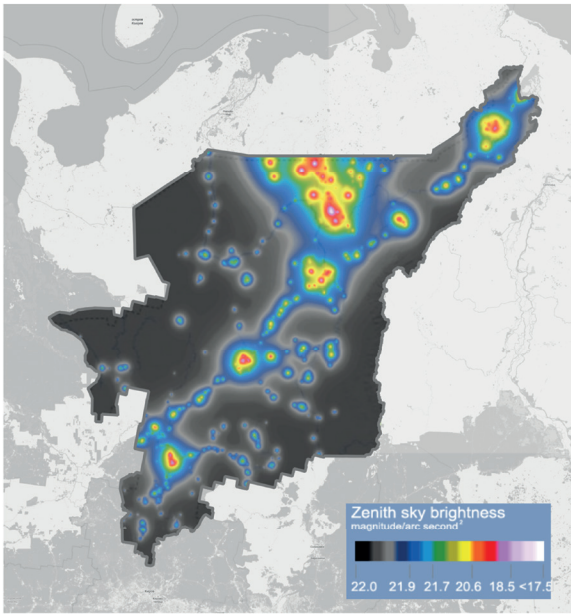


Fig. 13. Atlas of artificial sky glow based on satellite data (sources: Light Pollution Map and Adobe Illustrator)

The climate at a specific location is determined by the characteristics of the urban environment in its vicinity, not only on a local scale (within a radius of the first few hundred metres) but also on a mesoscale (within a radius of up to 10 km). This is because the thermal effects of small, homogeneous areas accumulate and are transported by air currents over the city. As a result, a meso-scale heat island is formed, which is most pronounced in city centres but, due to atmospheric transport, can spread to the outskirts of the metropolis and even into the suburbs. The heat island effect is also present in the Komi Republic, although the scale of its manifestation may be much smaller compared with large cities.

Using the Earth Engine dataset on global human-induced changes CSP gHM, a composite index of human-induced changes to the Earth’s surface has been compiled,

calculated by estimating the proportion of altered locations (pixels). The Komi Republic has a low population density and consists largely of natural landscapes, including forests, plains and various water bodies. As a result, the region does not exhibit a pronounced heat island effect, which typically occurs in urban areas with high building density and the use of paved surfaces (Fig. 12).

A map of artificial sky glow was also compiled using satellite data from the Light Pollution Map (World Atlas 2015). Based on Fig. 13, it can be concluded that sky glow is not caused solely by built-up areas.

Using data from the Light Pollution Map (World Atlas 2015) and the energy base catalogue of oil and gas fields, two maps were overlaid in Illustrator; from this, it can be concluded that sky glow corresponds geographically to the extent of active oil fields, as revealed by their

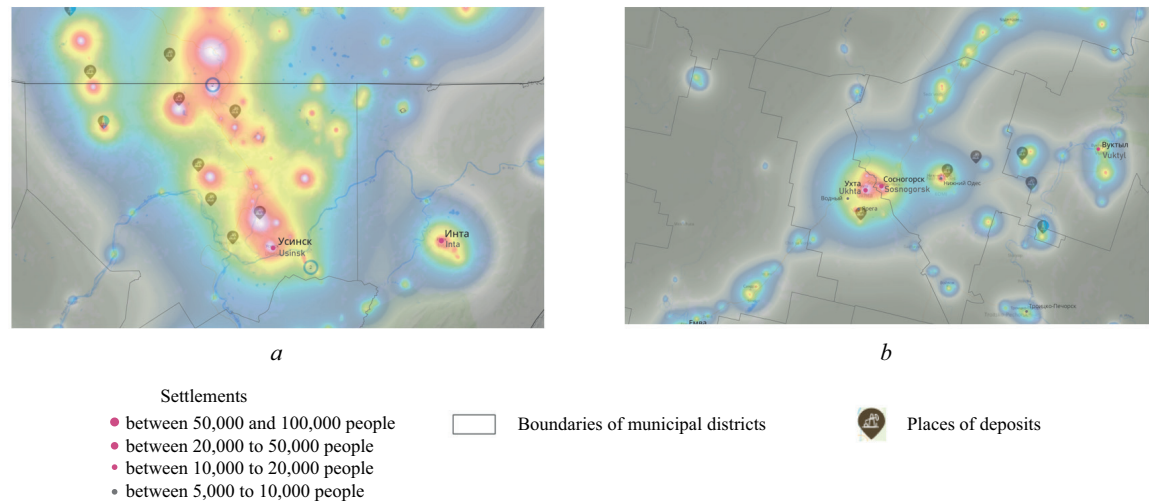


Fig. 14. Sky and field illumination, illustrated by the following examples: *a* — Usinsk District; *b* — Ukhta District (sources: Light Pollution Map, energy base and Adobe Illustrator)

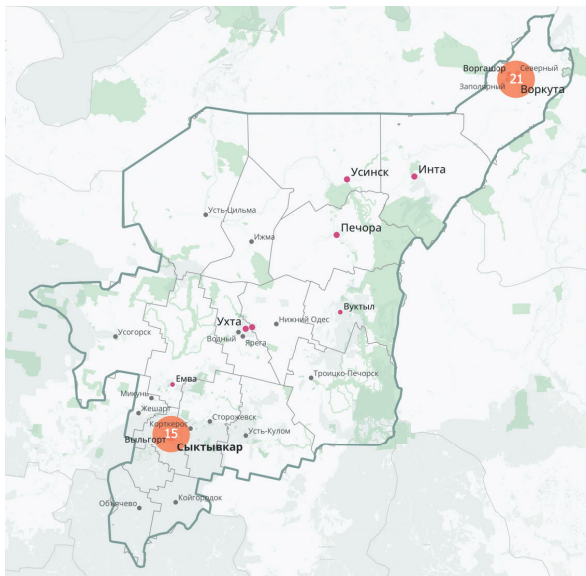


Fig. 15. Sites where hazardous waste is accumulated (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

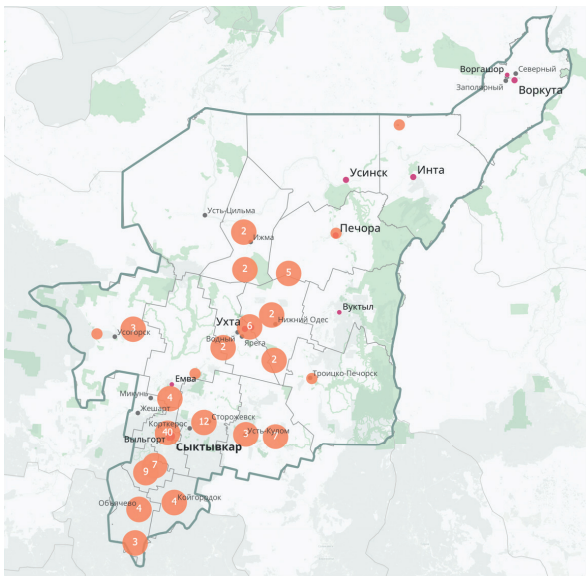


Fig. 16. Unauthorized waste disposal sites located on forest land (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

electric lighting, as well as the light and heat emitted during the combustion of natural gas (Fig. 14). Burning natural gas was originally dissolved in crude oil and is released from the solution during production. Drilling companies burn it off in a flare because it is impractical or uneconomical to use the gas on the drilling site, or because transporting it to market is costly. This practice produces a large flare of burning gas, which illuminates the surrounding area and releases high temperatures and pollution into the atmosphere.

In the second stage, using the data from the analysis of the territorial waste management scheme, maps of hazardous waste accumulation sites were drawn up and un-

authorized waste disposal sites located on forest fund land were identified (Fig. 15 and 16). Among the 11 regions of the North-West Federal District, the Komi Republic ranks fifth in terms of the volume of waste generated. The main contributors to the generation of waste harmful to both the environment and human health are mineral extraction and processing enterprises, as the Komi Republic is one of the largest energy and raw material bases in north-western Russia, particularly for coal, timber and oil. The main industrial sectors generating high levels of waste are coal mining (OJSC “Vorkutauhol”, OJSC “Intauhol Mine”), oil production (OJSC “Komnedra”, OJSC “Severnaya Neft”, OJSC “Yenisei”) and timber

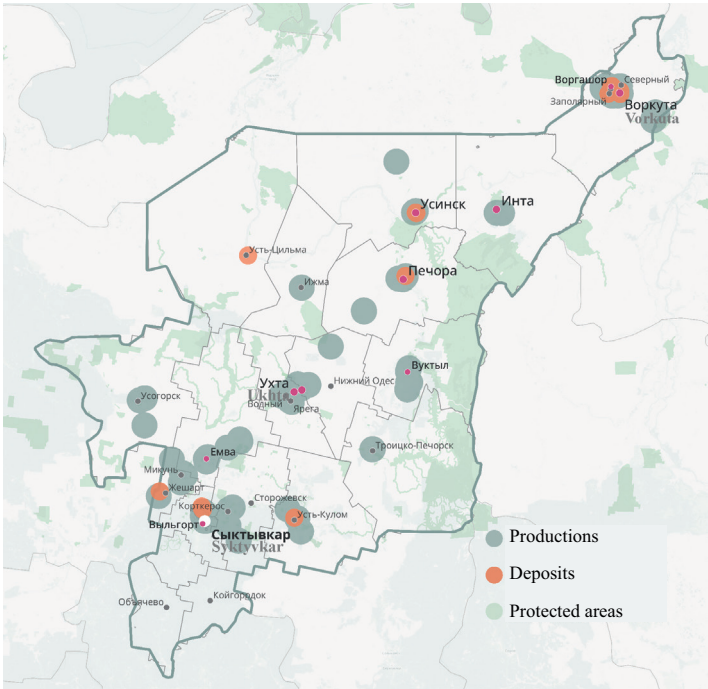


Fig. 17. Analysis of the distribution of sources of anthropogenic impact (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

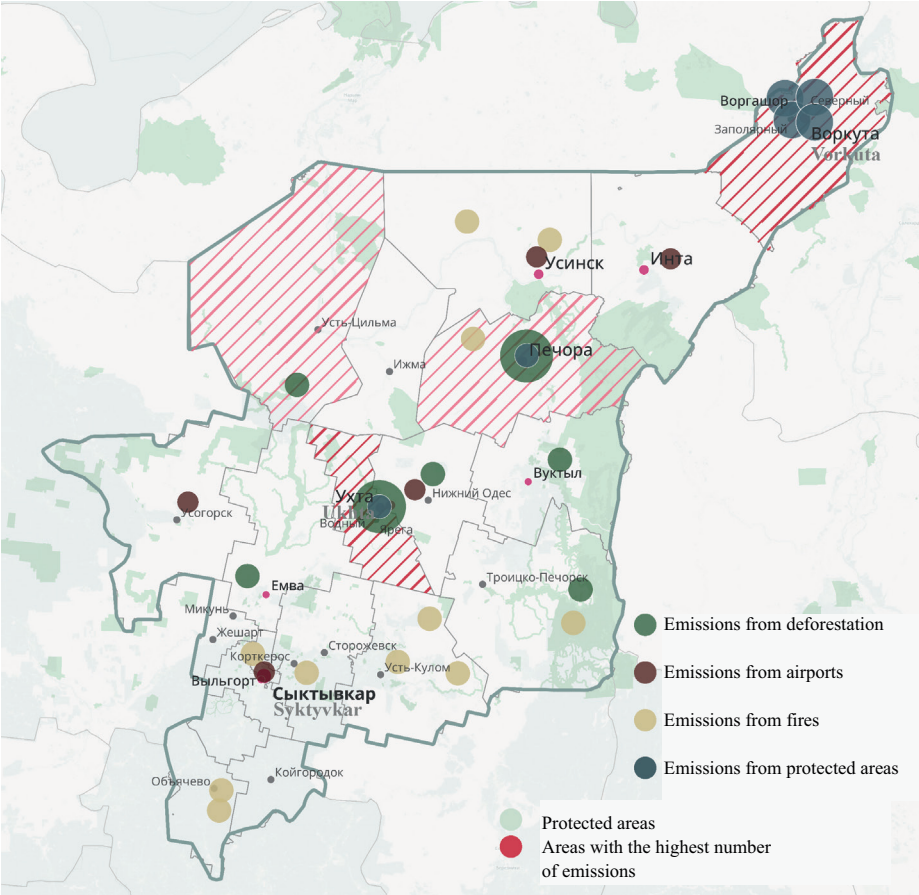


Fig. 18. Emissions from major sources (sources: Climate Trace and Adobe Illustrator)

processing (OJSC “Mondi SLPK”). In percentage terms, these enterprises account for 80 per cent of waste generation, and the areas affected by pollution are not limited to land alone. Waste that cannot be reused or recycled is sent to storage and disposal sites (Fig. 17).

Furthermore, using QGIS data, the locations of the main sources of anthropogenic impact were identified: industrial facilities and mineral deposits (Fig. 17). To calculate greenhouse gas emissions, Climate Trace data — based on satellite imagery, remote sensing methods and a trained artificial intelligence algorithm — were downloaded. A detailed analysis of global emissions made it possible to identify the locations of major sources and to estimate the quantitative emissions over time (Fig. 18). Based on this, it can be

concluded that an interrelated analysis of anthropogenic emission sources is being carried out, linking the indicators from the first stage of the study, waste accumulation sites, the locations of sources of anthropogenic impact, and the emission volumes of the main major sources (source: Climate Trace).

The third stage involves a statistical analysis of greenhouse gas emissions within the Komi Republic, including carbon dioxide CO₂, nitrogen oxides NO_x and methane CH₄, which have a significant impact on the region’s environment and climate.

Based on information from Climate Trace, a Table of attributes has been compiled for the three greenhouse gases, showing the name of the pollution source and its

Volume of pollutant emissions Source: ClimateTrace and Microsoft Excel

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		t			
Syktyvkar Urban District	Domestic airport	34,391.6	0.24	0.96	34,392.8
	International airport	1,344.79	0.01	0.04	1,344.84
	Road transport	72,867.7	2.39	1.88	72,871.97
	Power plant	2,175,000	—	—	2,175,000
	Municipal solid waste landfill	—	3,128.02	—	3,128.02
	Domestic and industrial waste (wastewater)	—	61.08	39.43	100.51
	Total	2,283,604.09	3,191.74	42.31	2,286,838.14

Continuation of the Table

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		t			
Syktyvdinsky District	Road transport	11,017	0.36	0.28	11,017.64
	Total	11,017	0.36	0.28	11,017.64
Vorkuta Urban District	Airport	1,190.59	0.01	0.03	1,190.63
	Vorgashorskaya Coal Mine	–	61,303.5	–	61,303.5
	Komsomolskaya Coal Mine	–	24,403.8	–	24,403.8
	Zapolyarnaya Coal Mine	–	29,799.1	–	29,799.1
	Vorkutinskaya Coal Mine	–	31,210.4	–	31,210.4
	Yunyaginskaya Coal Mine	–	1,099.78	–	1099.78
	Vorkuta Power Plant	659,000	–	–	659,000
	Total	660,190.59	147,816.59	0.03	808,007.21
Ukhta Urban District	Domestic airport	15,491.7	0.11	0.43	15,492.24
	International airport	51.04	–	–	51.04
	Ukhta Oil Refinery	443,825	60.68	6.19	443,891.87
	Municipal solid waste landfill	–	6,192.58	–	6,192.58
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	24.84	15.86	40.7
	Total	459,367.74	6,278.21	22.48	465,668.43
Inta Urban District	Airport	27.05	–	–	27.05
	Domestic and industrial waste (wastewater)		5.38	3.47	8.85
	Total	27.05	5.38	3.47	35.9
Usinsk Urban District	Airport	8,538.92	0.06	0.24	8,539.22
	Oil and gas field	1,010,970	19,093.7	–	1,030,063.7
	Power plant	286,000	–	–	286,000
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	4.99	–	4.99
	Total	1,305,508.92	19,098.75	0.24	1,324,607.91
Vuktyl Urban District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.32	0.85	2.17
	Total	0	1.32	0.85	2.17
Sosnogorsk Municipal District	Power plant	825,000	–	–	825,000
	Total	825,000	0	0	825,000
Knyazhpogostsky District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	2.25	–	2.25
	Total	0	2.25	0	2.25
Pechora Municipal District	Airport	596.43	–	0.02	596.45
	Power plant	2,429,000	–	–	2,429,000
	Waste disposal sites	–	3,767.91	–	3,767.91
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	5.39	3.48	8.87
	Total	2,429,596.43	3,773.3	3.5	2,433,373.23
Ust-Tsilemsky District	Airport	581.74	–	0.02	581.76
	Total	581.74	0	0.02	581.76
Izhemsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Udorsky Municipal District	Sredne-Timansky	276,633	–	–	276,633
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.24	0.81	2.05
	Total	276,633	1.24	0.81	276,635.05
Sysolsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0

End of the Table

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO _{2e}
		t			
Troitsko-Pechorsky District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.19	0.77	1.96
	Total	0	1.19	0.77	1.96
Kortkerossky District	–	1,533.45	2.73	0.07	1,536.25
	Total	1,533.45	2.73	0.07	1,536.25
Ust-Vymsky District	Municipal solid waste landfill	–	14,233.3	–	14,233.3
	Total	0	14,233.3	0	14,233.3
Ust-Kulomsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Priluzsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Koygorodsky District	Municipal solid waste landfill	–	7,122.65	–	7,122.65
	Total	0	7,122.65	0	7,122.65
Regional total		8,253,060.01	201,529.01	74.83	8,454 663.85

location within the region, as well as the total emissions of each greenhouse gas — both by individual pollution source and by district, and for the Komi Republic as a whole. The Table shows that the highest volume of emissions of these three greenhouse gases is concentrated in the Arctic zone of the Komi Republic.

In the fourth stage, a spatial GIS modelling scheme is drawn up based on three main pollutants: carbon dioxide CO₂, nitrogen oxides NO_x and methane CH₄, taking into account the extent of their impact on human health and the environment. Data from the attribute Table on total greenhouse gas emissions for each district

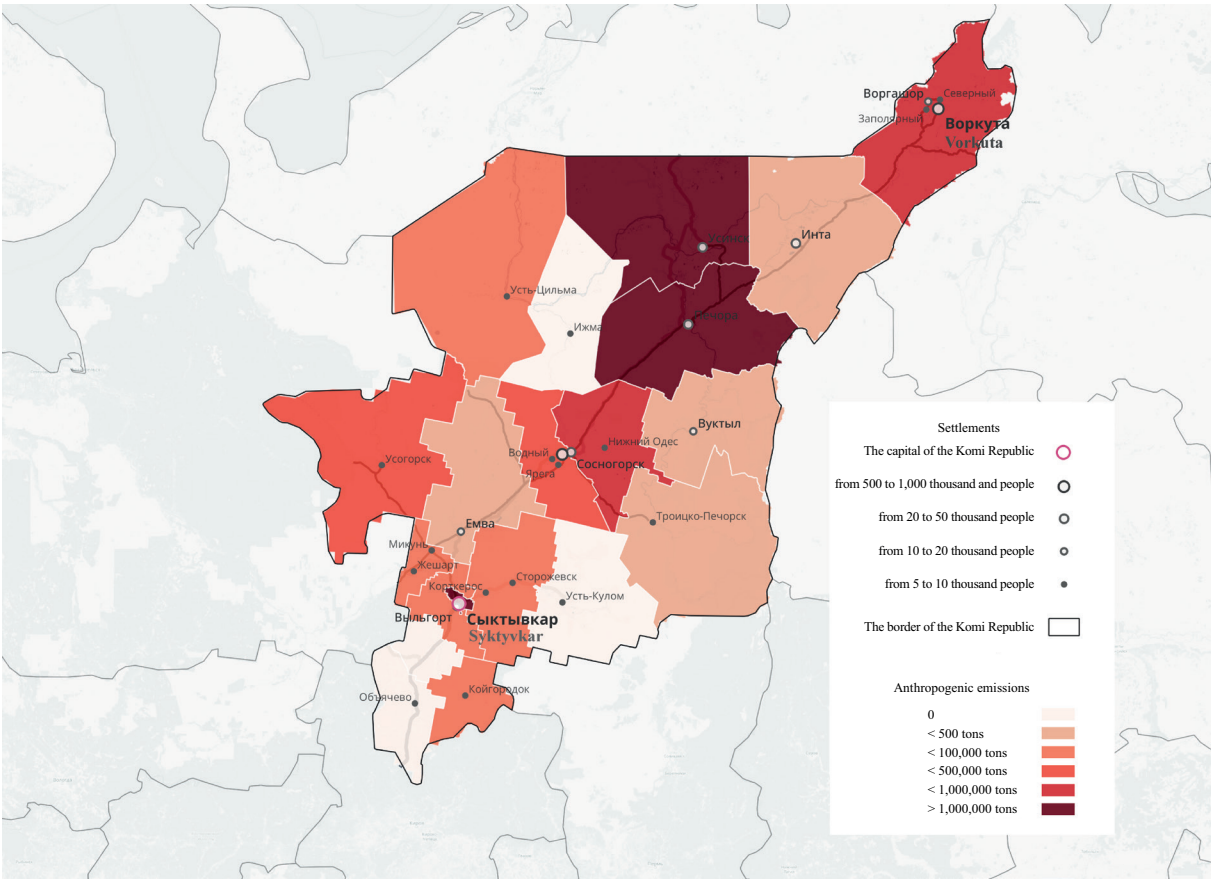


Fig. 19. Areas most vulnerable to climate change in the Komi Republic, prepared using QGIS based on data from Climate Trace

of the Komi Republic were imported into QGIS. Using a clustering method, five levels of the legend for anthropogenic emissions were created to colour-code the districts of the Komi Republic from light to dark, where light indicates the lowest levels of pollutants and dark indicates emissions exceeding 1 million tonnes. Following an analysis of emissions from each source of human activity, an environmental risk map was compiled for the 20 districts of the Komi Republic. This model clearly shows the highest levels of emissions in the Pechora and Usinsk districts, which are located in the Far North of the Komi Republic (Fig. 19).

To enhance the resilience of towns and cities in the Komi Republic in the face of global warming, it is necessary to develop and implement climate change adaptation plans. These plans should include the modernization of infrastructure and the housing stock, the improvement of emergency warning and preparedness systems, and the promotion of sustainable development and the use of renewable energy sources. Rising sea levels and changing climatic conditions may lead to damage to and destruction of urban infrastructure and the housing sector.

Several types of negative environmental impacts can be identified during the development of deposits:

- on the atmosphere, emissions from the combustion of the product;
- on aquatic and biological resources: discharge of wastewater, destruction of fauna during the construction of water crossings.

The 2015 Paris Agreement recognizes that climate change is a real and unprecedented challenge requiring urgent global action, and identifies such mitigation efforts as a contribution to “holding the increase in the global average temperature well below 2 °C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 °C, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change”.

In 2022, the environmental agenda became one of the key priorities for oil and gas companies in terms of sustainable development. Oil and gas firms are developing and implementing solutions to optimize their industrial operations in order to meet their emissions reduction targets. Among the ways in which oil and gas companies are transitioning towards “green” innovations, the following areas are worth noting:

1. The adoption of renewable energy sources — solar and wind power.
2. The production and distribution of biofuels.
3. Monitoring and reducing carbon emissions per unit in exploration and production: the introduction of innovative technologies (UAV, scanning, ultrasonic detectors).
4. Reducing the carbon footprint: carbon capture, utilization and storage (CCUS).

CONCLUSION AND DISCUSSION

Climate change is one of the most pressing and serious issues directly affecting our planet and all its ecosystems. This global phenomenon affects all regions of the world, including Russia and the Arctic region, of which the Komi Republic forms part.

This phased study has made it possible to analyze the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic region of the Russian Federation and to model a zoning analysis scheme that clearly illustrates the areas of emissions from the main major sources of pollution.

The application of environmental technologies and engineering solutions in the oil and gas industry has a number of practical applications aimed at reducing the negative impact on the environment. Some of these solutions include the use of modern purification methods and the introduction of new technologies and measures to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere during oil and gas extraction and processing.

REFERENCES

1. Kononova N.K. Changes in atmospheric circulation patterns in recent decades as a factor in changing climatic and ice conditions in the Arctic. *Materials of Glaciological Research*. 2006; 100:191-199. EDN PBFYVN. (rus.).
2. Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M., Rudakova Yu.L. Probabilistic estimates of change in applied indicators of the thermal regime for climate change adaptation over the territory of Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021; 7(2):140-158. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-140-158. EDN CYOUGW. (rus.).
3. Bolotova N.L. Features of the regional scenario of climate change in the northern territory by the example of the Vologda region. *Fundamental and Applied Research in Hydrometeorology : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of General Earth Science and Hydrometeorology of Belarusian State University*. 2023; 422-429. EDN GZYQOV. (rus.).
4. Manaeva I.V. Analysis of the climate — economy relationship in Russian cities. *Economy of Regions*. 2022; 18(3):837-851. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-3-15. EDN XZOHKK. (rus.).
5. Beksultanova A.I. The role of Russia in addressing the problem of climate change. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022; 92-4:64-65. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-173. EDN KBWVHW. (rus.).
6. Sidorenkova A.V. The impact of climate change on biodiversity. *Science Alley*. 2022; 1(1):(64):197-202. EDN YFEWYI. (rus.).
7. Wurihan, Sainbuyan Bayarsaikhan, Bao Yuhai, Tong Siqin, Jin Hujieletu, Yang Xueliang. Spatiotem-

poral variations of vegetation change and its response to climate change in Mongolia during 1982–2015. *Nature of Inner Asia*. 2022; 2-3(21):37–51. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51. EDN GFCYFL.

8. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E. Features of the Arctic climate in 2021. *Russian Polar Research*. 2022; 1(47):7–10. EDN ZJPQVQ. (rus.).

9. Overland J., Wang M., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M. et al. The urgency of Arctic change. *Polar Science*. 2019; 21:6–13. DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008. EDN XPVNOG.

10. Park T., Hashimoto H., Wang W., Thrasher B., Michaelis A.R., Lee T. et al. What does global land climate look like at 2 °C warming? *Earth's Future*. 2023; 11(5). DOI: 10.1029/2022ef003330. EDN EXKDXH.

11. Gusev A.P. Methane flows in the troposphere: geological and anthropogenic sources (according to sentinel-5P TROPOMI data). *Regional Geosystems*. 2023; 47(4):580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592. EDN XKYZTS. (rus.).

12. Alvarez J., Yumashev D., Whiteman G. A framework for assessing the economic impacts of Arctic change. *Ambio*. 2019; 49(2):407–418. DOI: 10.1007/s13280-019-01211-z. EDN WONNOV.

13. Ritchie H., Rosado P., Roser M. CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. 2023.

14. Toktomyshev S.Zh., Orozaliev M.D., Zhumaliyeva A.A., Abdylbaev A.S., Zhumabekov A.A. On the ozone layer and atmospheric climate change. *Materials Science*. 2015; 1(15):52–58. EDN RONRWX. (rus.).

15. Bondarenko L.V., Maslova O.V., Belkina A.V., Sukhareva K.V. Global climate change and its consequences. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2018; 2(98):84–93. EDN YWMJMQ. (rus.).

16. Koshkina A.S. Dynamics of climate changes in northwestern Siberia and their relationship with changes in atmospheric circulation. *Earth and Human. Current Issues of the Modern State of the Environment : Collection*

of Articles of the Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists dedicated to the 90th anniversary of the Russian State Hydrometeorological University. 2020; 47–51. EDN MVVXSA. (rus.).

17. Syromyatina M.V., Moskalenko I.G., Chistyakov K.V. Tendencies of climate change in the Altai mountains against the background of global climatic changes derived from instrumental and dendrochronological data. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2010; 3:82–91. EDN MVZETX. (rus.).

18. Mitrova T., Khokhlov A., Melnikov Yu., Pendero A., Melnikova M., Zalyubovsky E. *Global climate threat and the Russian economy: in search of a special path*. Moscow, SKOLKOVO Moscow School of Management, 2020. (rus.).

19. Snakin V.V. Global climate change: forecasts and reality. *Life of the Earth*. 2019; 41(2):148–164. EDN VQPBAP. (rus.).

20. Yumashev D., Hope C., Schaefer K., Riemann-Campe K., Iglesias-Suarez F., Jafarov E. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nature Communications*. 2019; 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09863-x. EDN EQVLIG.

21. Vavrus S.J. The influence of Arctic amplification on mid-latitude weather and climate. *Current Climate Change Reports*. 2018; 4(3):238–249. DOI: 10.1007/s40641-018-0105-2. EDN YJJQIH.

22. Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko K., Sutyryna E. Circulation factors in climate change in the Baikal region. *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019; 14. DOI: 10.1117/12.2538282

23. Kudelkin N. The arctic and global warming: adaptation to climate change and environmental protection. *Legal Studies*. 2022; 1:1–16. DOI: 10.25136/2409-7136.2022.1.37049. EDN KNUXCH. (rus.).

Received March 27, 2026.

Adopted in revised form on April 15, 2026.

Approved for publication on April 16, 2026.

B I O N O T E S : **Anna E. Korobeinikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 908166, Scopus: 57209303653, ResearcherID: AAC-8979-2022, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Alina A. Sokolnikova — Master of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 58565130700, ORCID: 0009-0000-2014-4333; sokolnikova99@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anna E. Korobeinikova — scientific guidance, research concept, development of methodology, final conclusions, revision of the text, scientific editing of the text.

Alina A. Sokolnikova — collecting material, processing material, writing source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения для экологичного строительства

Баласубраманиан Кандасубраманиан

Оборонный институт передовых технологий; г. Пуна, Индия

АННОТАЦИЯ

Введение. Быстрая урбанизация и необходимость декарбонизации застроенной среды сделали здания критически важной сферой для обеспечения устойчивости и климатической устойчивости с помощью материалов. По мере того как здания превращаются из статических потребителей энергии в адаптивные и ориентированные на производительность системы, достижения в области материалов нового поколения переопределяют вклад конструктивных элементов и элементов ограждающих конструкций в энергоэффективность, функциональность и интеллектуальное управление.

Материалы и методы. Обобщены последние достижения в области интеллектуальных и многофункциональных материалов, включая термоадаптивные системы, архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, которые позволяют встроить в строительные материалы датчики, средства преобразования энергии и адаптивные механизмы реагирования.

Результаты. Особое внимание уделяется материалам с фазовым переходом для терморегулирования, механическим метаматериалам с инженерной геометрией для гашения вибраций и механической адаптивности, а также трибоэлектрическим, пьезоэлектрическим и термоэлектрическим композитам, которые поддерживают распределенное извлечение энергии и автономное зондирование. Эти материальные системы позволяют зданиям функционировать как энергоактивные и информационно-осознанные инфраструктуры, а не как пассивные структурные объекты. Рассматриваются функциональное поведение, реакция на окружающую среду и значимость характеристик систем интеллектуальных материалов для применения в строительстве.

Выводы. Обобщая последние достижения и определяя критически важные функции на уровне материалов, намечены пути будущего развития интеллектуальных, низкоуглеродных и устойчивых к изменению климата зданий, которые становятся возможными благодаря передовым системам интеллектуальных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальные материалы, экологичные здания, многофункциональные композиты, экологически устойчивые строительные материалы

Благодарности. Автор выражает благодарность д-ру Б.Х.С.В. Нараяне Мурти, проректору Института передовых технологий Министерства обороны DIAT (DU), Пуна, за его постоянную поддержку и мотивацию, а также г-же Шрути Гупту и всем сотрудникам лаборатории аддитивного производства DIAT (DU) за их постоянную и ценную поддержку на протяжении всего исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кандасубраманиан Б. Интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения для экологичного строительства // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Автор, ответственный за переписку: Баласубраманиан Кандасубраманиан, meetkbs@gmail.com.

Next-Generation Smart and Multifunctional Materials for Green Buildings

Balasubramanian Kandasubramanian

Defence Institute of Advanced Technology; Pune, India

ABSTRACT

Introduction. Rapid urbanization and the imperative to decarbonize the built environment have positioned buildings as a critical domain for materials-driven sustainability and climate resilience. As buildings evolve from static energy consumers to adaptive and performance-oriented systems, advances in next-generation materials are redefining the contribution of structural and envelope components to energy efficacy, functionality, and intelligent operation.

Materials and methods. This review synthesizes recent progress in smart and multifunctional materials, including thermal-adaptive systems, architected mechanical metamaterials, and energy-harvesting functional composites that enable sensing, energy conversion, and adaptive response to be intrinsically embedded within building materials.

Results. Particular emphasis is placed on phase change materials for thermal regulation, geometry-engineered mechanical metamaterials for vibration mitigation and mechanical adaptability, and triboelectric, piezoelectric, and thermoelectric composites that support distributed energy harvesting and self-powered sensing. These material systems enable buildings to operate as energy-active and information-aware infrastructures rather than passive structural entities. The review further contextualizes the functional behavior, environmental response, and performance relevance of smart material systems for building-scale applications.

Conclusions. By consolidating recent advances and identifying critical material-level functions, this work outlines future pathways for the development of intelligent, low-carbon, and climate-resilient buildings enabled through advanced smart material systems.

KEYWORDS: smart materials, green buildings, multifunctional composites, sustainable construction materials

Acknowledgements. The author would like to express gratitude towards Dr. B.H.S.V. Narayana Murthy, Vice-Rector of DIAT (DU), Pune, for his constant support and motivation, would also like to thank Ms. Shruti Gupta along with all the lab members of the additive manufacturing lab, DIAT (DU) for their continuous and valuable support throughout the study.

FOR CITATION: Kandasubramanian B. Next-Generation Smart and Multifunctional Materials for Green Buildings. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Corresponding author: Balasubramanian Kandasubramanian, meetkbs@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость декарбонизации человеческой деятельности и повышения устойчивости к изменению климата сделала строительный сектор ключевой областью для технологических вмешательств и реформ. Ускоренная урбанизация, растущие потребности в энергии для эксплуатации и непропорционально высокая нагрузка на окружающую среду, связанная с традиционными строительными процессами, в совокупности подчеркивают целесообразность пересмотра парадигм проектирования материалов в секторе застроенной среды [1]. Современные строительные практики ответственны за значительную долю глобальных антропогенных выбросов CO₂, добычи ресурсов и образования твердых отходов, что требует внедрения инновационных решений, основанных на передовом материаловедении [2]. Недавние оценки еще больше подчеркивают эту актуальность: согласно отчету о состоянии дел UNEP GlobalABC за 2024/2025 г., сектор зданий и строительства вносит примерно 34–37 % в общий объем выбросов CO₂, связанных с энергетикой, что делает его крупнейшим отдельным сектором, способствующим изменению климата [3]. Эти выбросы включают не только углерод, образующийся в процессе эксплуатации в результате отопления, охлаждения, вентиляции, освещения и использования бытовой техники, но и углерод, заложенный в добыче материалов, производстве цемента и стали, транспортировке и строительных работах на объекте. Компонент заложенного углерода все чаще признается в качестве доминирующего фактора на протяжении всего жизненного цикла высокоэффективных зданий, поскольку эксплуатационная эффективность повышается за счет теплоизоляции, электрификации и интеграции возобновляемых источников энергии [4, 5].

В связи с растущей углеродной ответственностью инновации в области строительных материалов становятся ключевым механизмом, с помощью которого строительный сектор может выполнить национальные и международные требования по декарбо-

низации, включая цели ООН в области устойчивого развития (ЦУР), в частности ЦУР 7 «Доступная и чистая энергия», 9 «Промышленность, инновации и инфраструктура», 11 «Устойчивые города и населенные пункты», 12 «Устойчивое потребление и производство» и 13 «Меры по борьбе с изменением климата и его последствиями», каждая из которых определяет чистую энергию, города с устойчивой инфраструктурой и ответственное использование материалов в качестве основных приоритетов развития [6].

В этом контексте разработка, характеристика и широкомасштабная интеграция материалов нового поколения для производства экологически чистых зданий представляют собой стратегически значимый путь к созданию низкоуглеродной, ресурсоэффективной и адаптированной к климату инфраструктуры. Передовые системы материалов, разработанные с учетом многофункциональности, долговечности и внутренней адаптивности, открывают возможности для отделения эксплуатационных характеристик конструкций от интенсивности использования материалов, сокращения выбросов, связанных с техническим обслуживанием, а также встраивания энергетических и сенсорных функций непосредственно в конструкцию здания [7, 8].

На рис. 1 представлен схематический обзор основных классов материалов, которые в настоящее время продвигаются для использования в экологических и «умных» зданиях, и показано, как биоматериалы, переработанные материалы, гибридные и «умные» функциональные материалы в совокупности способствуют проектированию низкоуглеродных и многофункциональных зданий.

В рамках этой формирующейся парадигмы «умных» зданий материалы играют основополагающую роль, одновременно выступая в качестве несущих элементов, функциональных интерфейсов и активных преобразователей энергии и информации. В отличие от традиционных строительных материалов, системы материалов нового поколения разработаны так, чтобы демонстрировать внутреннюю способность реагировать на тепловые, механические, элек-

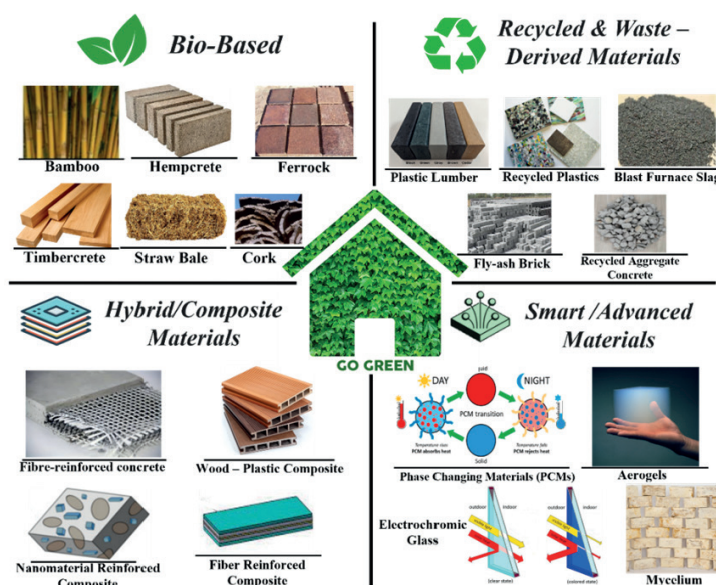


Рис. 1. Устойчивые материалы, используемые для строительства экологических зданий

трические и экологические стимулы, позволяя строительным компонентам воспринимать, адаптироваться и реагировать без опоры на внешние устройства [9, 10]. Такая ориентированность на материалы достигается за счет разработки интеллектуальных и многофункциональных материалов, которые интегрируют возможности терморегулирования, сбора энергии, сенсорного контроля и приведения в действие непосредственно в конструкцию здания.

Выходя за рамки классического дискурса об устойчивом развитии, сосредоточенного на сокращении углеродного следа и эффективном использовании ресурсов, концепция «умных зданий» вводит многогранную структуру, в которой материалы являются не просто пассивными структурными элементами, а активными участниками взаимодействия с окружающей средой, модуляции энергии и автономной адаптации [11]. Современные определения «умных зданий» подчеркивают важность интегрированной киберфизико-материальной архитектуры, в которой конструктивные элементы обладают термофизической адаптивностью, децентрализованным преобразованием энергии, возможностью сбора данных в режиме реального времени, обнаружением повреждений и автономной функциональной реконфигурацией. Указанные возможности обусловлены не только механическими или электрическими подсистемами, но все в большей степени внутренними функциональными возможностями, заложенными в передовых системах материалов. Переход от пассивных к интеллектуальным материалам представляет собой важную границу в достижении высокоэффективных, нулевых по выбросам и устойчивых к климатическим изменениям строительных технологий [12]. Этот сдвиг парадигмы выходит за рамки традиционного строительства за счет внедрения многофункциональных материалов и адаптивных компонентов, которые синергетически

взаимодействуют с системами управления зданием (BMS), тем самым обеспечивая динамический контроль над параметрами теплового режима, освещения, конструкции и качества воздуха [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этом контексте в данной обзорной статье рассматриваются интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения как средства создания экологических, интеллектуальных и устойчивых к климатическим изменениям зданий. В обзоре анализируются ключевые классы материалов, включая термоадаптивные материалы, архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, с акцентом на состав материалов, микроструктурный дизайн и поведение, определяемое геометрией, обеспечивающее терморегуляцию, механическую адаптивность, преобразование энергии и самодиагностику в конструктивных элементах и элементах ограждающих конструкций. Также обсуждается, как внутренние функциональные возможности материалов, такие как термофизическая адаптивность, преобразование энергии и самодиагностика, могут быть встроены непосредственно в конструктивные элементы и элементы ограждающих конструкций, тем самым снижая зависимость от вспомогательных механических или электрических подсистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интеллектуальные и многофункциональные материалы для экологически устойчивого строительства

Термоадаптивные интеллектуальные материалы

Термоадаптивные интеллектуальные материалы составляют основной функциональный класс в ин-

теллектуальных и экологически устойчивых зданиях, обеспечивая динамическую регулировку теплопередачи, солнечного нагрева и аккумулирования тепла в ответ на воздействия окружающей среды. Эти материалы работают за счет обратимого изменения своих теплофизических или оптических свойств, таких как теплопроводность, теплоемкость, инфракрасная излучательная способность или солнечная пропускная способность, при изменениях температуры, солнечной радиации или условий окружающей среды. В отличие от традиционных пассивных систем теплоизоляции, термоадаптивные материалы активно взаимодействуют с суточными и сезонными тепловыми циклами, позволяя ограждающим конструкциям, фасадам и внутренним элементам здания регулировать тепловой поток в режиме реального времени [14]. Такое адаптивное поведение способствует снижению нагрузки на системы отопления и охлаждения, пикового спроса на энергию и теплового дискомфорта жильцов, тем самым обеспечивая энергоэффективную и климатоустойчивую эксплуатацию здания. Интеграция таких материалов в стены, системы остекления, крыши и гибридные конструкции ограждающих элементов позволяет встроить тепловые функции непосредственно в структуру здания, снижая зависимость от механических систем и одновременно повышая долгосрочную эксплуатационную эффективность и устойчивость.

Тепловая адаптивность все чаще выходит за рамки внутренней реакции материалов благодаря интеграции неинвазивного, основанного на данных распознавания тепловой адаптации человека в стратегии терморегулирования зданий. W. Duan и соавт. продемонстрировали, что теплоадаптивное поведение жильцов можно определять в реальном времени с помощью основанных на зрительном восприятии кросс-модальных систем дистилляции знаний, что обеспечивает точное распознавание поведения при сниженной вычислительной сложности и облегчает внедрение интеллектуального управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC) [15]. Это исследование демонстрирует, что поведенческие сигналы могут служить надежными управляющими сигналами для динамической регулировки теплового режима в помещениях без использования инвазивных датчиков. В дополнение к этому подходу Y. Bai и соавт. разработали инфракрасную систему пространственно-временного моделирования, идентифицирующую одиннадцать типичных видов поведения, связанного с термоадаптацией, достигнув точности распознавания до 95,89 % и точности прогнозирования тепловых ощущений 96,24 %, при этом сохранив устойчивость к изменчивому освещению и обеспечив конфиденциальность жильцов [16]. В исследовании использовались контролируемые тепловые условия 22–25, 25–27 и 27–30 °C, при этом участники сидели в тишине в течение 20 мин для тепловой акклиматизации перед сбором данных, а видеозаписи осуществлялись одно-

временно с пяти ракурсов для обеспечения всесторонней фиксации теплоадаптивного поведения [17]. Расширяя термоадаптивность на наружные условия, H. Li и соавт. объединили инфракрасную термографию с мониторингом поведения, чтобы количественно оценить взаимосвязь между температурой кожи пешеходов, физиологической эквивалентной температурой (PET) и адаптивными реакциями, выявив стабилизацию температуры кожи при значениях PET примерно 40–46 °C в зависимости от типа активности, и определив поведение, связанное с поиском тени, как наиболее эффективную стратегию смягчения последствий экстремального теплового стресса [18]. Кроме того, K. Li и соавт. продемонстрировали, что тепловую адаптивность можно также реализовать на микроструктурном уровне с помощью фотонных металлоорганических каркасов, демонстрирующих термически усиленную люминесценцию, сверхвысокую светоотдачу (~49 700 фотонов на МэВ) и стабильность, превышающую 95 % после длительного теплового и радиационного воздействия [19]. В то время как микроструктурная инженерия обеспечивает внутреннюю термоадаптивность, неинвазивная оценка термоадаптивного поведения и комфорта обеспечивает обратную связь на системном уровне, необходимую для работы «умного» здания, как показано в табл. 1.

Полевые исследования дополнительно продемонстрировали, что термоадаптивность в зданиях определяется поведением жильцов, климатическими условиями и пассивными или полупассивными стратегиями регулирования. A.S. Cordero и соавт. представили результаты всестороннего полевого исследования в сельских жилых зданиях, показав, что жильцы демонстрируют широкий диапазон адаптивного комфорта, обусловленный длительным воздействием климатических факторов и корректировкой поведения, при этом нейтральные температуры смещаются в сторону более высоких значений по сравнению со стандартными моделями комфорта [23].

Среди термоадаптивных интеллектуальных материалов фазово-переходные материалы (PCM) представляют собой одну из наиболее эффективных стратегий регулирования теплового микроклимата в помещениях посредством пассивного накопления и отдачи тепла. PCM используют обратимые фазовые переходы «твердое – жидкое» или «твердое – твердое» для поглощения, накопления и отдачи больших количеств скрытой теплоты в узких температурных интервалах, которые совпадают с диапазонами теплового комфорта человека. При интеграции в ограждающие конструкции зданий стены, потолки, полы или фасадные конструкции PCM смягчают колебания температуры в помещении, ослабляя пиковые тепловые нагрузки в дневное время и высвобождая накопленную тепловую энергию в более прохладные периоды [25, 26]. Эта врожденная способность к тепловому буферированию снижает зависимость от механических систем

Табл. 1. Методы оценки неинвазивного термоадаптивного поведения и теплового комфорта

Тип обнаружения	Инструмент обнаружения/ измерения	Модель прогнозирования/ анализа	Термический показатель	Ключевые параметры эффективности	Ссылки
Температура лица и адаптивные меры по тепловому мониторингу/инфракрасный	Бинокулярная инфракрасная камера, YOLOv5, Mediapipe	Random Forest и взвешенное слияние с PMV	TSV (7 классов, 3 класса)	Точность: 82,86 % (7 классов), 94,29 % (3 класса); повышается до 86,8 % (7 классов) и 100 % (3 класса) при обнаружении адаптивных действий	[20]
Температура воздуха в помещении, температура кожи/временные ряды	Датчики климатической камеры, платформа IVE	Декомпозиция временных рядов и регрессия по Δ-особенностям	Тепловое состояние, приемлемость, поведенческие намерения	Выявленные тенденции, временные интервалы между пиками и минимумами, а также продолжительность всплесков как основные факторы, определяющие несоответствие между виртуальной и реальной средами	[21]
Адаптивное поведение жильцов/анкета	Опрос	Иерархическая кластеризация и логистическая регрессия	Термическая приемлемость, %	Интенсивность открывания окон до 87–91 %; в домах с кондиционером приемлемость составила 79 % против 70 % в домах без кондиционеров	[22]
Термоадаптивное поведение/инфракрасное видео	Камеры инфракрасной термографии (IRT)	I3D, модели глубокого обучения SlowFast	Классификация тепловых предпочтений	Точность: 83,53 % (I3D) и 88,56 % (SlowFast) с временем вывода на уровне миллисекунд	[23]
Тепловое адаптивное поведение/беспроводные сигналы	Информация о состоянии канала Wi-Fi (CSI)	2D CNN–LSTM, 2D CNN–GRU	Классификация PTAB	Максимальная точность 86 % (CNN–LSTM); оптимальный размер окна 0,5 с, шаг 0,2 с	[24]

отопления и охлаждения, смягчает пиковый спрос на энергию и повышает стабильность теплового комфорта при суточных и сезонных колебаниях. В отличие от традиционных материалов для накопления явного тепла, PCM обеспечивают высокую плотность накопления энергии без значительного повышения температуры, что делает их особенно подходящими для строительных элементов с ограниченным пространством. Их интеграция в строительные материалы, системы герметизации или композитные слои позволяет встроить тепловую адаптивность непосредственно в конструкцию здания, что позиционирует PCM как критически важную материальную платформу для проектирования зданий с низким энергопотреблением, ориентированных на жильцов и устойчивых к климатическим изменениям [27].

На рис. 2 показана интеграция и механизм работы PCM в ограждающих конструкциях зданий. Слой PCM, встроенный между слоями изоляции, поглощает поступающее тепло от солнечного излучения и теплопроводности в периоды высоких темпера-

тур, аккумулируя энергию за счет фазового перехода из твердого в жидкое состояние и снижая теплопередачу внутрь помещения. В более прохладных условиях накопленное тепло высвобождается по мере повторного затвердевания PCM.

Профиль температуры энтальпии на рис. 2, *b* подчеркивает плато скрытой теплоты, что позволяет накапливать значительное количество энергии в узком диапазоне температур, обеспечивающем комфорт, и обеспечивает эффективную пассивную тепловую буферизацию. Общая тепловая энергия *Q*, накопленная в PCM с температурой плавления *T_m*, К, затем рассчитывается, как указано в уравнении (1):

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{pi}dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{ps}dT,$$

где *T_i* — начальная температура, К; *C_{pi}* — средняя удельная теплоемкость в диапазоне между *T_m* и *T_i*; *a_m* — доля расплавленного материала; *Δh_m* — удельная скрытая теплота плавления; *T_f* — конечная температура, К; *C_{ps}* — средняя удельная теплоемкость в диапазоне между *T_f* и *T_m*.

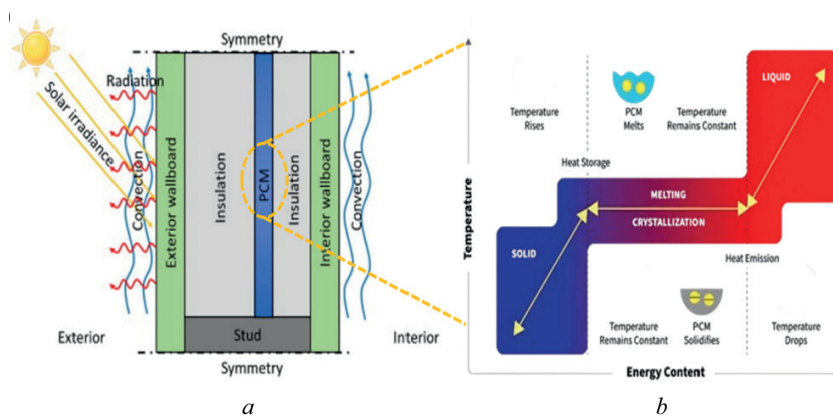


Рис. 2. Внедрение PCM в стену (а), перепечатано с разрешения [27] Elsevier, 2020; принцип работы PCM (b), перепечатано с разрешения [28] Elsevier, 2022

PCM можно встраивать в бетонную кладку или вводить в отделочные слои, такие как гипсовые, штукатурные или цементные покрытия, как правило, посредством микрокапсулирования для обеспечения стабильности и технологичности [28–31]. Такая интеграция на основе покрытий упрощает внедрение, позволяет точно регулировать долю PCM и толщину слоя, а также является выгодной для повышения тепловых характеристик существующих зданий. Кроме того, PCM могут изготавливаться в виде отдельных стеновых панелей, что обеспечивает быструю установку и совместимость с легкими конструктивными системами [32, 33]. Термоадаптивность зданий с использованием фазово-переходных материалов можно условно разделить на четыре взаимодополняющих направления развития: накопление скрытой теплоты на биологической основе, архитектуры PCM со стабилизированной формой или механической гибкостью, соединение PCM с ограждающими конструкциями и гибридизация PCM с использованием солнечной энергии. В рамках биологического подхода M. Zor и соавт. продемонстрировали эвтектические PCM на основе жирных кислот, пропитанные в деревянные шпаны, демонстрирующие температуру плавления 30 °C и емкость накопления скрытой теплоты, достигающую 225,5 Дж/г, что свидетельствует о пригодности возобновляемых субстратов в качестве масштабируемых резервуаров скрытой теплоты для низкоуровневого теплового буферирования в зданиях [33]. Что касается механических функциональных систем, то Y. Guo и соавт. разработали фазово-переходный гидрогель, содержащий декагидрат сульфата натрия, достигнув высокой эффективности упаковки PCM в 90,4 % по массе, теплопроводность в диапазоне 0,89–1,11 Вт м⁻¹К⁻¹, термическое восстановление формы в течение 385 с и прочность на сжатие до 0,67 МПа, продемонстрировав, что интеграция PCM может одновременно решать задачи уменьшения утечек и обеспечения механической прочности [34]. Для использования в ограждающих конструкциях A. Gopalan и соавт. исследовали динамические изоля-

ционные панели с PCM, сообщив о снижении годовой теплоотдачи излучением на 15–72 % и годовых теплопотерь на 7–38 % (в зависимости от климатических условий и ориентации фасада), подчеркнув усиление характеристик PCM за счет совместного проектирования на системном уровне [35]. Расширяя функциональность PCM на системы солнечной энергии, J.M. Mahdi и соавт. провели оценку фотовольтаикотеплового (PVT) коллектора, интегрированного с наномодифицированным PCM, содержащим 5 % объемной концентрации наночастиц, достигнув продолжительности охлаждения фотоэлементов 54–305 мин в течение года, пиковой электрической мощности примерно 52,5 Вт и тепловой мощности до 225 Вт, продемонстрировав потенциал наноусиленных PCM для стабилизации производительности фотоэлектрических систем при одновременном сборе полезной тепловой энергии для зданий [35, 36]. В другом исследовании, проведенном V.V. Upadhyay и соавт., были изучены усовершенствованные TiO₂ парафиновые PCM для систем накопления тепловой энергии за счет скрытой теплоты (LHTES) с использованием 0,5–2,0 мас. % наночастиц [37, 38]. Теплопроводность увеличилась на 35–88 %, ускорив процессы зарядки (накопления тепла) и разрядки (выделения тепла) PCM. При скорости потока теплоносителя 0,01 кг/с PCM с 0,5 % TiO₂ улучшила эффективность зарядки, разрядки и общую эффективность LHTES на 2,89, 5,21 и 2,25 % соответственно по сравнению с чистым парафином.

Помимо использования исключительно накопления скрытой теплоты, тепловая адаптивность также реализована с помощью гибридных систем ограждающих конструкций, которые объединяют пассивную терморегуляцию с очисткой воздуха в помещениях, как показано на рис. 3.

Конфигурация каталитической стены Тромбе объединяет термохромное остекление из гидрогеля с внутренним воздушным каналом, покрытым каталитическим слоем, что позволяет одновременно регулировать солнечное излучение и разлагать загрязняющие вещества. Гидрогель демонстрирует тем-

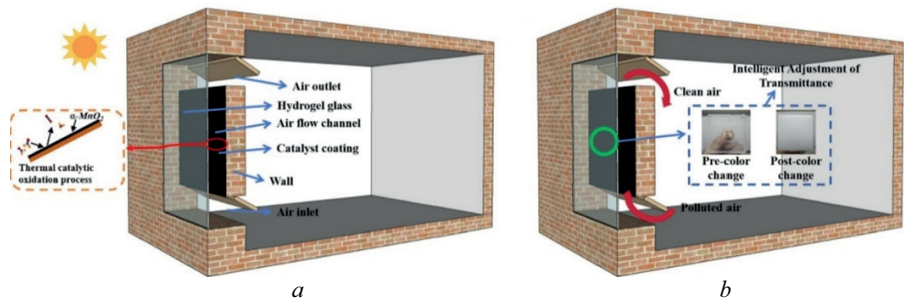


Рис. 3. Схема системы (a); схема работы системы (b). Воспроизведено с разрешения [39] Elsevier, 2025

пературно-зависимое снижение коэффициента пропускания солнечного излучения с 0,9 до 0,3 в диапазоне 20–25 °С, что подавляет чрезмерное поступление солнечного тепла и смягчает перегрев [39]. В результате система снижает температуру поверхности наружной стены на 3,2 °С и температуру воздуха в помещении на 2,5 °С по сравнению с традиционными стенами Тромбе. Одновременно каталитический слой способствует термокаталитическому окислению загрязняющих веществ, достигая эффективности удаления формальдегида 44,6 % в течение 70 мин, тем самым демонстрируя возможность создания многофункциональных ограждающих конструкций зданий, сочетающих термоадаптивность с контролем качества воздуха в помещении.

В дополнение к этому J. Gu и соавт. предложили гибридную систему, интегрированную в крышу, которая сочетает радиационное охлаждение от неба с низкотемпературным каталитическим окислением, как показано на рис. 4, что обеспечивает непрерывное терморегулирование и очистку воздуха в помещении как в дневных, так и в ночных условиях [40].

Система направляет теплый загрязненный воздух из помещения через воздухопровод, покрытый термокатализатором, расположенный под радиационной охлаждающей поверхностью, которая отражает солнечное излучение и одновременно интенсивно излучает в инфракрасном диапазоне. Такая конфигурация способствует одновременному отводу тепла в атмосферу и каталитическому разложению загрязняющих веществ. При летней температуре окружающей сре-

ды 35 °С система обеспечивала снижение температуры внутреннего воздуха относительно наружного до 5 °С и генерировала около 665,29 м³ очищенного воздуха на 1 м² поверхности в течение суток. Полученные результаты подтверждают эффективность совмещения технологий радиационного охлаждения и каталитической очистки воздуха для комплексного управления тепловым режимом и качеством воздушной среды на уровне здания.

Архитектурные механические метаматериалы

Архитектурные механические метаматериалы представляют собой класс передовых систем материалов, в которых макроскопическое механическое поведение определяется, в первую очередь, инженерной геометрией, что обеспечивает беспрецедентный контроль над жесткостью, режимом деформации, поглощением энергии и распространением волн [41]. В отличие от традиционных строительных материалов, свойства которых в значительной степени определяются составом и технологией обработки, механические метаматериалы получают свою многофункциональность за счет специально разработанной архитектуры элементарных ячеек и иерархических структур, что обеспечивает беспрецедентный контроль над жесткостью, соотношением прочности к весу, режимом деформации, распространением волн и рассеиванием энергии [42, 43]. Эта геометрически ориентированная парадигма позволяет материалам демонстрировать свойства, которые трудно достичь в объемных твердых телах, включая отрицательный коэффициент Пуассона, квазиулеву или отрица-

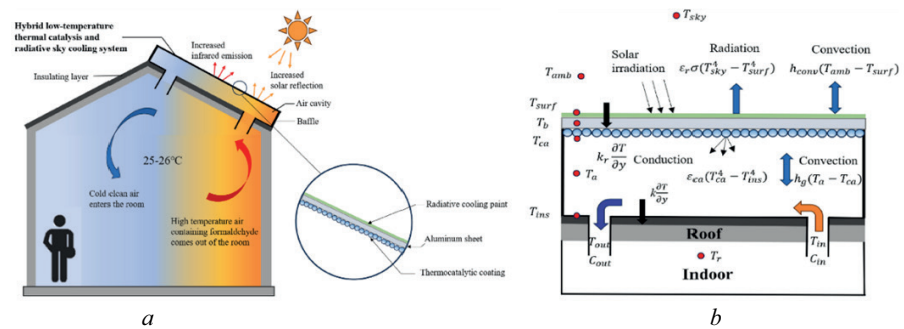


Рис. 4. Схема гибридной системы низкотемпературного термокатализа и радиационного охлаждения небом (a); схема механизма теплопередачи системы (b). Воспроизведено с разрешения [40]. Elsevier, 2024

тельную жесткость, программируемую сжимаемость и адаптированное поведение запрещенной зоны для подавления вибраций и волн [44]. Как показано на рис. 5, архитектурные механические метаматериалы разрабатываются в рамках иерархической структуры проектирования, охватывающей внутренние компоненты материала, геометрию элементарной ячейки, собранные структуры и реализации на уровне устройств, что обеспечивает сверхлегкий вес, сверхвысокую жесткость, отрицательную механическую реакцию и активно перенастраиваемую функциональность, которые актуальны для систем «умных» зданий.

В контексте «умных» и экологически устойчивых зданий архитектурно спроектированные механические метаматериалы открывают революционные возможности для отделения конструктивных характеристик от материальной насыщенности, что позволяет создавать легкие, многофункциональные и адаптивные строительные элементы. Благодаря встраиванию функциональности в геометрию мета-

материалы дают возможность одному конструктивному элементу одновременно выполнять функции несущей конструкции, гашения вибраций, датчика и устройства для сбора энергии. Эта способность актуальна для зданий следующего поколения, где от конструктивных элементов ожидается взаимодействие с киберфизическими системами здания, реагирование на стимулы окружающей среды и активный вклад в обеспечение устойчивости и энергоэффективности, а не просто выполнение роли пассивных опор [46]. В масштабе здания различные классы архитектурных метаматериалов предлагают преимущества для конкретных применений в зависимости от механизмов деформации и геометрической программируемости. Метаматериалы, вдохновленные оригами и характеризующиеся складными и разворачиваемыми архитектурами, особенно хорошо подходят для адаптивных фасадов, реконфигурируемых устройств затенения и реагирующих ограждающих конструкций, где крупные обратимые трансформации

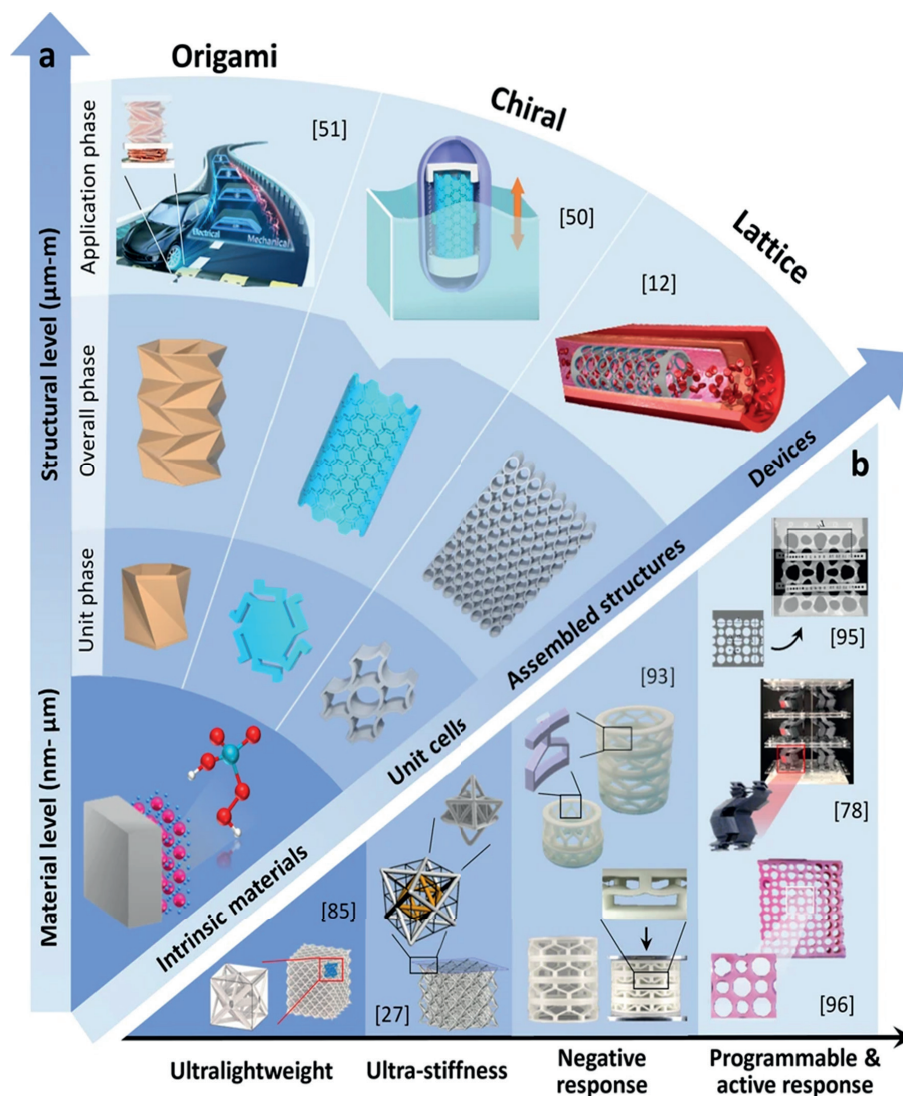


Рис. 5. Категории метаматериалов от уровня материала до уровня конструкции (а); свойства метаматериалов (б). Перепечатано с разрешения [45]. Wiley, 2023

ции формы позволяют динамически регулировать дневное освещение, вентиляцию и теплообмен. Хиральные и ауксетические метаматериалы, демонстрирующие механизмы вращательной деформации и отрицательное поведение коэффициента Пуассона, обеспечивают повышенное сопротивление сдвигу, рассеивание энергии и устойчивость к разрушению, что делает их привлекательными кандидатами для сейсмостойких ядер, ударопрочных стен и виброгасящих конструктивных элементов. Напротив, периодические решетчатые и ячеистые метаматериалы, включая архитектуры октагональных ферм и тройных периодических минимальных поверхностей (TPMS), предлагают исключительно высокое соотношение жесткости к весу и настраиваемые характеристики демпфирования, что позволяет создавать легкие несущие перекрытия, адаптивные плиты, виброизолирующие платформы и многофункциональные конструктивные компоненты [47].

С системной точки зрения архитектурно спроектированные механические метаматериалы могут быть стратегически интегрированы в конструктивные, фундаментные, ограждающие и внутренние подсистемы интеллектуальных зданий. В конструктивных и фундаментных системах периодические и локально резонансные архитектуры метаматериалов позволяют ослаблять низкочастотные колебания и сейсмические волны за счет формирования частотных запрещенных зон, предлагая альтернативу или дополнение к традиционным методам виброизоляции. В отличие от традиционных систем изоляции, которые часто страдают от больших смещений или ограниченной эффективности против вертикального движения, фундаменты из метаматериалов мо-

гут быть спроектированы с учетом доминирующих сейсмических частот, сохраняя при этом несущую способность и структурную целостность [48]. Ярким примером является разработка сейсмических фундаментов из метаматериалов, в которых периодические или локально резонирующие структуры встраиваются под надстройки зданий для ослабления как горизонтальных, так и вертикальных сейсмических волн. Y. Jiang и соавт. экспериментально подтвердили эффективность масштабированного фундамента из метаматериалов (MMF) для многоэтажного здания, как показано на рис. 6, продемонстрировав эффективное ослабление вибраций в режимах сверхнизких частот (<10 Гц) без ущерба для конструктивной устойчивости [49].

Подавление возникало за счет геометрически обусловленных запрещенных зон и эффектов локального резонанса, о чем свидетельствуют характеристики дисперсии, показанные на рис. 6, а не за счет дополнительного демпфирования материала или массы. Несмотря на эту высокую способность к фильтрации вибраций, основа из метаматериала сохраняла достаточную несущую способность и структурную стабильность, тем самым подтверждая практическую осуществимость стратегий сейсмозащиты на базе метаматериалов для реальной гражданской инфраструктуры. В ограждающих конструкциях зданий и внутренних системах архитектурные решетки и ячеистые метаматериалы обеспечивают улучшенную виброизоляцию, акустическое поглощение и ударопрочность, при этом значительно снижая массу конструкции. Такие характеристики особенно выгодны для высотных зданий, сборных плит перекрытий, фасадных элементов и плавающих полов, где вибро-

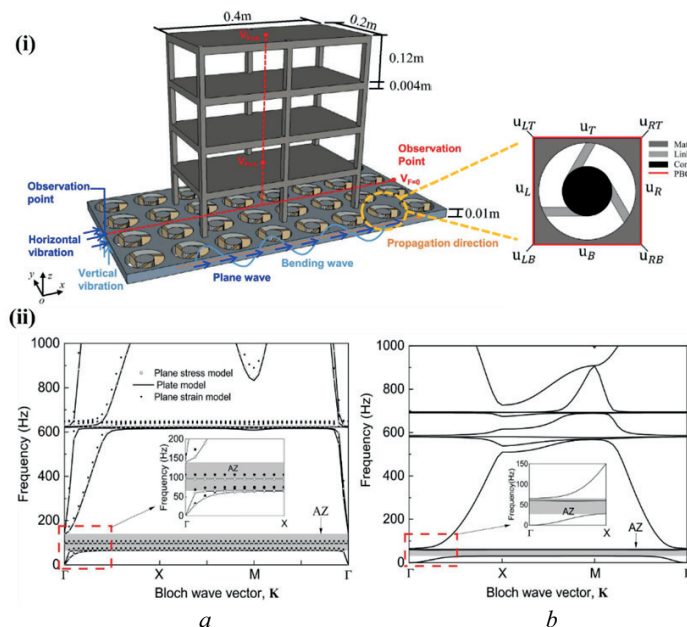


Рис. 6. Модель каркаса MMF при воздействии плоских и изгибных волн с элементарной ячейкой, подверженной периодическим граничным условиям (i); кривые дисперсии (a) плоских волн и (b) изгибных волн (ii). Перепечатано с разрешения [49]. Elsevier, 2025

изоляция и шумоизоляция являются критически важными показателями эксплуатационных характеристик. Кроме того, возможность регулировать жесткость и демпфирование за счет конструкции элементарной ячейки позволяет адаптироваться к изменениям в заполненности здания, условиям нагрузки и воздействиям окружающей среды [42, 50]. J. Shi и соавт. представили систему засыпки из метабетона, включающую локально резонирующие включения в цементной матрице для подавления вибраций, передаваемых по грунту. Результаты экспериментов продемонстрировали значительное ослабление вибраций, вызванных дорожным и железнодорожным движением, в диапазоне 5–30 Гц, что позволило достичь виброизоляции на уровне субволновых размеров, недостижимой при использовании традиционных траншей или свай. Данный подход предлагает масштабируемое решение для чувствительных к вибрациям «умных» зданий, расположенных в густонаселенных городских коридорах [51]. В другом исследовании предлагается концептуальная основа, рассматривающая механические метаматериалы как элемент интеллектуальной гражданской инфраструктуры. Было показано, что цементные композиты и решетчатые структуры со специально спроектированной архитектурой обеспечивают снижение плотности материала на 20–40 % при сохранении прочности на сжатие на уровне, отличающемся не более чем на 10 % от показателей традиционного бетона. При этом удельная прочность превышала $0,08 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$, что существенно выше аналогичных характеристик традиционных строительных материалов.

Помимо механических функций, архитектурные метаматериалы также служат платформами для многофункциональной интеграции. Благодаря встраиванию в архитектурные каркасы фаз «умных» материалов, таких как пьезоэлектрические, трибоэлектрические или магниточувствительные элементы, конструктивные компоненты могут выполнять функции распределенных датчиков, приводов и устройств для сбора энергии. Такая интеграция обеспечивает автономный мониторинг состояния конструкций, обратную связь в реальном времени и взаимодействие с системами управления зданиями, усиливая роль метаматериалов в киберфизико-материальных архитектурах зданий [52]. R. Hamzehei и соавт. сообщили о многофункциональных синусоидальных механических метаматериалах, напечатанных на 3D-принтере, которые сочетают виброизоляцию с квазиулеевой жесткостью (QZS) со встроенным сбором энергии, что дает возможность создавать автономные компоненты для интеллектуальных зданий [52]. Решетки были изготовлены из термопластичного полиуретана (TPU) для обратимого изгиба синусоидальных распорок с целью достижения поведения QZS и эффективной виброизоляции при частотах возбуждения выше ~15 Гц, где коэффициент передачи опускался ниже единицы. Пьезоэлектрический биморфный привод, расположенный в областях решет-

ки с высокой деформацией, генерировал пиковое напряжение ~3 В и плотности мощности 600–700 мкВт/г при 15 Гц. Кроме того, накладки из титаната цирконата свинца (PZT), установленные на полусотовую опору, генерировали ~500 мВ с плотностью мощности, приближающейся к 800 мкВт/г при ~90 Гц, что достаточно для питания низкоэнергетических беспроводных датчиков, демонстрируя возможность самоподдерживающейся виброизоляции и мониторинга состояния конструкций в интеллектуальных зданиях следующего поколения. На уровне материальных систем K. Baggi и соавт. разработали бетон из метаматериалов со встроенными наногенераторами, встраивая ауксетические полимерные решетки в проводящую цементную матрицу [53]. Полученные композиты достигали до 15 % обратимой сжимаемости при циклической нагрузке, обеспечивая при этом пиковую выходную электрическую мощность около 330 мкВт, что позволяет одновременно нести нагрузку, собирать энергию и осуществлять автономное зондирование. Эти классы материалов, основанные на геометрии, предоставляют возможность рационально адаптировать механические характеристики в архитектурных масштабах, способствуя интеграции адаптивности, устойчивости и многофункциональности в интеллектуальные и экологически устойчивые строительные системы нового поколения.

Композиты для сбора энергии и интеллектуальные функциональные композиты

Функциональные композиты, собирающие энергию, становятся важнейшей платформой материалов для зданий с нулевым энергопотреблением и устойчивых к климатическим изменениям, поскольку они преобразуют повсеместные возбуждения здания, такие как вибрации окружающей среды, циклические эксплуатационные нагрузки, шаги, колебания, вызванные фасадом или ветром, и тепловые градиенты, в полезную электрическую энергию, одновременно обеспечивая автономное зондирование и структурную интеллектуальность [54–56]. В отличие от традиционных систем возобновляемой энергии, таких как фотоэлектрические панели на крышах или внешние накопители энергии, эти материальные системы встраивают механизмы преобразования энергии непосредственно в конструкцию здания, обеспечивая распределенное, децентрализованное и не требующее обслуживания производство электроэнергии при сохранении структурной целостности [57]. Этот сдвиг парадигмы превращает здания из пассивных потребителей энергии в активные инфраструктуры, способные собирать механические, тепловые и экологические стимулы окружающей среды, присущие застроенной среде [58].

Как показано на рис. 7, композитные материалы с функциями сбора энергии и интеллектуальными свойствами могут быть стратегически интегрированы в полы, фундаменты, стены, фасады и кровельные системы, где они собирают механическую и тепло-

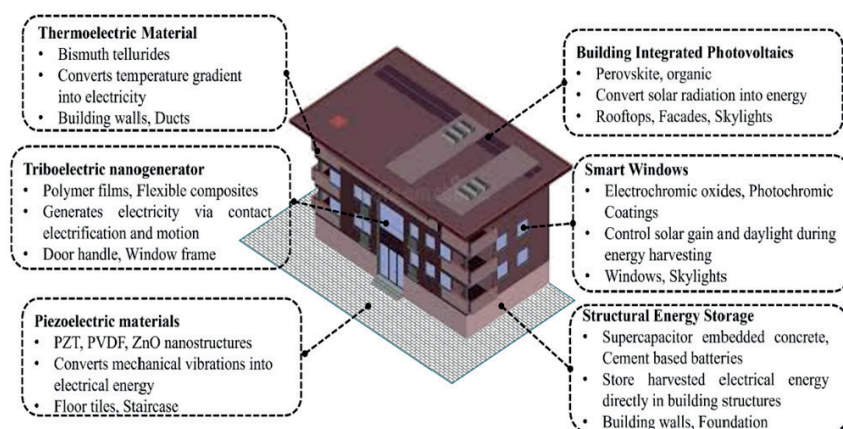


Рис. 7. Интеграция интеллектуальных материалов в различные компоненты здания

вую энергию, генерируемую в ходе повседневной эксплуатации здания [59]. Генерируемая локально электрическая энергия используется для питания распределенных сенсорных узлов, предназначенных для мониторинга состояния конструкций, отслеживания вибраций, определения присутствия людей и измерения параметров окружающей среды, что обеспечивает непрерывный сбор данных без необходимости подключения к внешней энергетической инфраструктуре. В сочетании с проводящими или самочувствующими композитными матрицами эти системы дополнительно поддерживают обнаружение в реальном времени изменения деформации, зарождения трещин и накопления повреждений [60]. Эта децентрализованная, встроенная в материал архитектура энергообеспечения и сенсоров превращает здание из пассивного потребителя энергии в энергоактивную, богатую информацией систему, способную к прогнозируемому техническому обслуживанию, адаптивному реагированию и повышенной эксплуатационной устойчивости. Такая интеллектуальная система, ориентированная на материалы, подчеркивает ключевую роль функциональных композитов с функцией сбора энергии в экологических зданиях нового поколения, где экологичность, долговечность и интеллектуальная функциональность проектируются совместно на уровне материалов. В исследовании Н.В. Virgin и соавт. был изучен экоземляной цементный композит, армированный углеродными микроволокнами, интегрирующий функцию измерения деформации в экологичные строительные материалы [60]. Благодаря частичной замене цемента и введению углеродных микроволокон вблизи порога электрической перколяции (0,025–0,25 % по массе) композит достиг коэффициентов усиления, превышающих 100, сохранив при этом достаточную механическую целостность для применения в несущих конструкциях и малоэтажном строительстве, что подчеркивает многофункциональность, заложенную на уровне материала, снижая воздействие на окружающую среду и обеспечивая мониторинг конструкции в режиме реального времени.

Кроме того, в исследовании М. Ergün и соавт. выполнено численное моделирование «умного» здания из железобетона (ж.б.) с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и размещением пьезоэлектрических датчиков, при этом численная модель была проверена с помощью соответствующей экспериментальной установки, как показано на рис. 8 [61].

Конструкция подвергалась реалистичным эксплуатационным нагрузкам, представляющим жильцов и мебель, а также сейсмическим воздействиям, приложенным в вертикальном направлении для моделирования колебаний, вызванных землетрясением. Экспериментально измеренные вибрационные реакции показали хорошее согласие с прогнозами МК для начального смещения 18 мм, что свидетельствует о точном отражении динамических характеристик системы. Аналогичное соответствие наблюдалось при более высоком начальном смещении 28 мм, что подтверждает надежность численной модели в прогнозировании вибрационного поведения и реакций, значимых для сбора энергии, при различных интенсивностях возбуждения.

В исследовании W. Thongthapthai и соавт. был разработан трибоэлектрический наногенератор на основе портландцемента (PC) и натурального каучука (NR) (PC/NR-SL-T TENG), предназначенный для использования в качестве «умного энергетического пола» с целью улавливания биомеханических колебаний (ходьба, бег, вибрации, вызванные скоплением людей) [62]. В диапазоне 1–10 Гц пиковое напряжение (V_{pp}) увеличилось с 46 В (1 Гц) до 242 В (10 Гц), что свидетельствует о сильном частотно-зависимом усилении, связанном с реальными спектрами возбуждения окружающей среды в застроенных средах. Плотность мощности достигала 3,27 Вт/м² при нагрузке 5 Н и частоте 5 Гц, что примерно в 11 раз превышает показатели стандартного TENG на основе поликарбоната (0,29 Вт/м²). Пол дополнительно усиливается конденсатором, способным заряжаться (10–47 мкФ) при нагрузке 5 Н и частоте 5 Гц через выпрямительную схему, что указывает на возможность использования стратегий прерывистого пита-

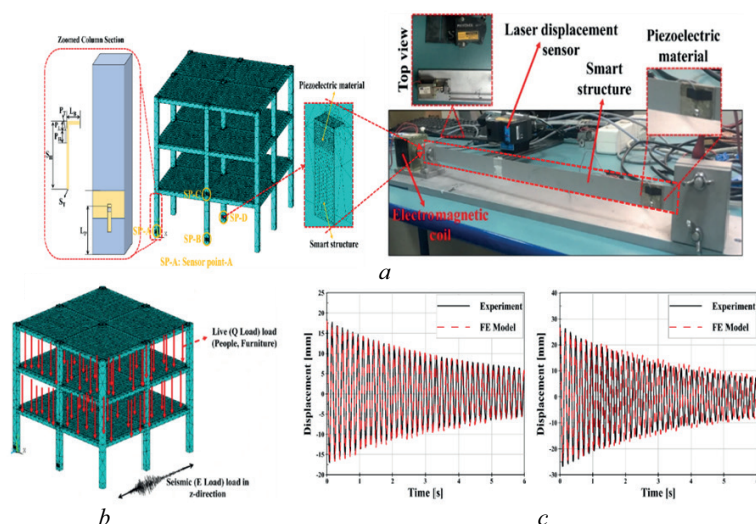


Рис. 8. МК-модель и расположение датчиков в «умном» здании из ж.б., а также экспериментальная установка (а); постоянные и сейсмические нагрузки (б); экспериментальные и расчетные колебательные реакции при $a = 18$ мм и $b = 28$ мм соответственно (с). Перепечатано с разрешения [62]. Springer, 2025

ния или буферизации в автономных сенсорных узлах. В аналогичном исследовании Р. Не и соавт. решили проблему давней чувствительности к влаге трибоэлектрических систем на основе древесины, разработав полностью деревянный TENG (AW-TENG) с применением обработанной древесины в качестве фрикционного слоя и спрессованной карбонизированной древесины в качестве электрода, тем самым повысив гидрофобность и проводимость за счет обработки [63, 64]. В условиях высокой влажности (80 % относительной влажности) оптимизированный AW-TENG достиг напряжения холостого хода $V_{oc} = 50,85$ В и тока короткого замыкания $I_{sc} = 0,72$ мкА. В отличие от цементных TENG-полов, подход AW-TENG использует технологии переработки биомассы и карбонизацию деревянных электродов, обеспечивая экологическую устойчивость. Кроме того, Е. Keel и соавт. сообщили о разработке высокоэффективного трибоэлектрического наногенератора (TENG) на основе трехмерной графеновой пены (3DG)/ПЭТ (PET). Поверхность графена характеризовалась гидрофобным углом смачивания $138,52^\circ$ и шероховатостью поверхности $2,4 \pm 0,5$ мкм, что способствовало повышению генерации электрического заряда и снижению межфазной адгезии. Устройство на основе 3DG обеспечивало напряжение холостого хода 400 В, ток короткого замыкания 105,7 мкА и удельную выходную мощность $10\,372$ мВт/м² при частоте 3 Гц и сопротивлении нагрузки 40 МОм.

В дополнение к сбору энергии на полу были исследованы трибоэлектрические системы, интегрированные в крышу, для улавливания механической энергии, вызванной дождем. В исследовании Q. Dai и соавт. оценен сборщик энергии капель (DEN) на крышах с различными углами наклона и архитектурной геометрией [54]. Для наклонных крыш мгновенная пиковая мощность на каплю резко снижалась

с увеличением угла наклона: с 81,6 мкВт при 100° до 0,42 мкВт при 180° , что подчеркивает роль динамики удара и скользящего поведения. Для различных морфологий крыш DEN генерировал 12,14 мкВт на классической крыше, 146,6 мкВт на куполообразной крыше и 86,3 мкВт на крыше башенного типа, что демонстрирует, что архитектурная кривизна значительно влияет на эффективность сбора энергии. В условиях моделируемого дождя конденсатор емкостью 4,7 мкФ заряжался до 1,0, 0,4 и 0,2 В при расходе 9, 45 и 64 мл/с соответственно. В табл. 2 приведено сравнение TENG на основе различных материалов в качестве трибоэлектрического слоя.

Кроме того, интеллектуальные цементные композиты на основе нитей, включающие в себя трибоэлектрические нити с плетеной сердцевинкой и оболочкой, встроенные непосредственно в портландцемент, продемонстрировали возможность одновременного достижения структурного усиления, сбора механической энергии и автономного зондирования [74]. Благодаря контролируемой модификации морфологии поверхности нитей трибоэлектрическое выходное напряжение увеличено более чем на 120 %, а при полномасштабном внедрении в дорожное покрытие в сочетании с беспроводной передачей данных и алгоритмами глубокого обучения была достигнута 100%-ная точность классификации транспортных средств, определения скорости и распознавания пешеходов. В дополнение к цементу, армированному нитями, проводящие композиты на цементной основе, содержащие углеродные наполнители, близкие к порогу электрической перколяции, позволяют цементу функционировать в качестве структурного энергетического материала. Эти системы поддерживают трибоэлектрический сбор энергии от ветра и биомеханического движения, приводящегося в действие контактной электризацией, одновременно функцио-

Табл. 2. Сравнение TENG на основе различных материалов в качестве трибоэлектрического слоя

Материалы		Свойства			Ссылки
Электроотрицательные	Электроположительные	Напряжение холостого хода V_{oc} , В	Ток короткого замыкания I_{sc} , мкА	Плотность выходной мощности P_{out} , мВт/м ²	
Полиимид	Лазерный индуцированный графен	3500	60	2361	[65]
Графит	Скомканный графен	15	–	15	[66]
Полидиметилсилоксан PDMS	Углеродные нанотрубки CNT	383	25	8000	[67]
Полиэтилентерефталат	Пленки из шелкового фиброина	213,9	0,34	68	[68]
PDMS	Графен, полученный методом сдвигового отслаивания	233	0,731	131,4	[69]
Полиэтилентерефталат	3D-графен	400	105,7	10 372	[70]
Полимолочная кислота PLA	Желатин	500	16	5000	[71]
Нитроцеллюлозная бумага	Бумага для взвешивания	360	250	–	[72]
Поливинилиденфторид (PVDF), наполненный углеродным наполнителем	Нейлон-6	1,4	6	19,7	[73]

нируя в качестве структурных конденсаторов, способных к локальному накоплению энергии. Y. Yuan и соавт. исследовали геополимерные термоэлектрические композиты в качестве энергетических материалов, встроенных в инфраструктуру зданий [74]. Введение электропроводящих наполнителей позволило обеспечить коэффициент Зеебека до 1092 мкВ/К при температуре 293 К и максимальный коэффициент

мощности 0,84 мкВт·м⁻¹·К⁻², при этом прочность геополимера на сжатие сохранялась на уровне 33,4 МПа. В исследовании Y. Ra и соавт. изучили трибоэлектрический наногенератор на основе цементного проводящего композита (CBC-TENG), встроенный в здание с нулевым энергопотреблением, как показано на рис. 9, где представлены режимы сбора энергии: на стенах (ветер), на полу (движение человека) и на крыше

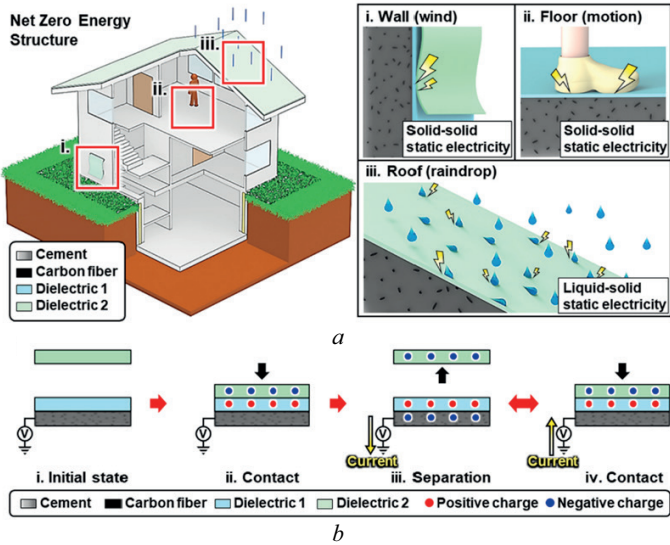


Рис. 9. Концептуальная схема жилой системы с нулевым энергопотреблением, иллюстрирующая интеграцию структурных компонентов на основе CBC, способных собирать энергию из нескольких возобновляемых источников окружающей среды, включая (i) энергию ветра, (ii) биомеханическую энергию, генерируемую человеческой деятельностью, и (iii) энергию капель дождя (a); схематическое изображение механизма сбора энергии, основанного на контактной электризации, реализованного благодаря использованию CBC (b). Перепечатано с разрешения [12]. Elsevier, 2021

(капли дождя) [12]. Настенные CBC-TENG под воздействием ветра генерировали непрерывное выпрямленное выходное напряжение ~ 5 В, тогда как CBC-TENG, встроенные в пол, собирали биомеханическую энергию посредством контакта «твердое – твердое» при повторяющихся шагах, производя стабильные переменные выходные сигналы после выпрямления. Установленные на крыше CBC-TENG, работающие за счет контактной электризации жидкость – твердое тело, генерировали напряжение от капель деионизированной воды при частоте 1 Гц и угле наклона крыши 65° , причем выходное напряжение систематически увеличивалось с ростом частоты капель. Помимо цементных материалов, С. Prouskas и соавт. предложили U-образную архитектуру сенсibilизированного красителем солнечного элемента (DSSC) со светоулавливающей конструкцией, предназначенную для эксплуатации в наружных условиях [75]. Геометрия перераспределяет падающий солнечный свет на вертикально установленные DSSC посредством внутреннего отражения, эффективно снижая локальную интенсивность излучения и ограничивая фотодegradацию. Такая конфигурация позволила увеличить коэффициент заполнения до $\sim 96\%$ при наружном освещении, сохранив при этом выработку электроэнергии, сопоставимую с традиционными DSSC с вертикальным освещением. Помимо фотоэлектрических оболочек, М. Fu и соавт. разработали термотропные ионные гидрогелевые «умные» окна, сочетающие адаптивную солнечную регулировку с термоэлектрическим сбором энергии [76]. Гидрогель демонстрировал обратимый фазовый переход около 26°C , обеспечивая высокую светопропускаемость ($>90\%$) ниже температуры перехода и сильную солнечную модуляцию ($\sim 80\%$) выше нее. Одновременно ионный транспорт, вызванный температурным градиентом, генерировал выраженный термоэлектрический отклик с коэффициентом Зеебека $39,03$ мВ/К, коэффициентом мощности $0,838$ мВт/м²/К и плотностью энергии до 250 мДж/м², демонстрируя многофункциональные оконные элементы для «умных» зданий.

Перспективы

Развитие технологий экологичного и интеллектуального строительства требует перехода от однофункциональных строительных материалов к, по сути, многофункциональным, адаптивным, инженерным системам материалов, способным поддерживать рабочие характеристики в суровых условиях. Разработка гибридных интеллектуальных материалов, интегрирующих терморегуляцию, механическую устойчивость, самодиагностику и преобразование энергии в рамках единой материальной структуры, позволила бы снизить сложность межфазных взаимодействий и усилить функциональную синергию. Такие материалы требуют передовых композитных архитектур, в которых фазы накопления скрытой теплоты, проводящие сети и полимеры, реагирующие на стимулы, сосуществуют без неблаго-

приятных эффектов перекрестного взаимодействия. Кроме того, разработка химических составов материалов, устойчивых к усталости и самостабилизирующихся, использующих динамические ковалентные связи, супрамолекулярные взаимодействия или механизмы обратимого сшивания, имеет решающее значение для поддержания функциональной целостности при длительных циклических тепловых и механических нагрузках. Архитектурно-проектируемые механические метаматериалы должны развиваться в направлении систем с программируемой геометрией, способных к адаптивной модуляции жесткости, гашению вибраций и реконфигурируемому рассеиванию энергии посредством фазовых переходов материала или нестабильностей, вызванных напряжением. Кроме того, критически важно появление энергоактивных конструкционных материалов, в которых цементные, полимерные или биопроизводные матрицы, в которые встроены трибоэлектрические, пьезоэлектрические или термоэлектрические фазы, функционируют одновременно как несущие компоненты и устройства сбора распределенной энергии. Интеллектуальные материалы также должны обладать устойчивостью к воздействию окружающей среды, сохраняя стабильные функциональные характеристики в условиях влажности, ультрафиолетового излучения и экстремальных температур благодаря стратегиям герметизации и инженерии поверхностей. Материалы должны представлять собой биоинспирированные и спроектированные с учетом жизненного цикла системы, сочетающие иерархический дизайн, встроенную способность к самодиагностике и возможность вторичной переработки, что позволит зданиям превратиться в энергоактивные, информационно насыщенные и устойчивые инфраструктуры, а не в пассивные конструктивные узлы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Умные» и экологичные здания стали центральным компонентом глобальных стратегий, направленных на смягчение последствий изменения климата, сокращение потребления ресурсов, а также повышение устойчивости и комфорта жилой среды. По мере того как здания превращаются из статичных потребителей энергии в адаптивные и ориентированные на эффективность системы, передовые материалы играют решающую роль в обеспечении этой трансформации.

Рассмотрены интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения, способствующие созданию «умных», низкоуглеродных и устойчивых к климатическим изменениям зданий. Материальные системы, такие как архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, демонстрируют основные функции здания, включая терморегуляцию, гашение вибраций, преобразование энергии, сенсорные измерения и адаптивную реакцию, которые могут быть неотъемлемой частью конструктивных элементов и элементов

ограждающих конструкций. Благодаря использованию состава материалов, микроструктурного проектирования и поведения, определяемого геометрией, эти системы позволяют функциональности возникать непосредственно из материала, а не через внешние подсистемы. Растущая интеграция реагирующих и самочувствующих материалов еще больше укрепляет эту парадигму, обеспечивая распознавание состояния, функциональную адаптивность и стабильность характеристик в условиях динамически меняющейся окружающей среды

и заполняемости. Постоянный прогресс в области проектирования и характеристик материалов повышает надежность и способствует соответствию требованиям на уровне всего здания. Эти разработки позиционируют интеллектуальные материалы как ключевые факторы, позволяющие строить здания в виде адаптивных, энергоактивных и интеллектуальных систем, способных внести значимый вклад в долгосрочную устойчивость, климатическую устойчивость и ориентированность на человека.

Поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: Баласубраманиан Кандасубраманиан — лаборатория аддитивного производства, кафедра металлургии и материаловедения; Оборонный институт передовых технологий; 411025, г. Пуна, Гиринангар, штат Махараштра, Индия; meetkbs@gmail.com.

INTRODUCTION

The global imperative to decarbonize human activity and strengthen climate resilience has positioned the construction sector as a pivotal domain for technological intervention and sustainable reform. The accelerated urbanisation, escalating operational energy demands, and the disproportionate environmental burden associated with conventional construction workflows collectively underscore the urgency of reconfiguring material design paradigms within the built-environment sector [1]. The contemporary construction practices account for substantial fractions of global anthropogenic CO₂ emissions, resource extraction, and solid-waste generation, thereby necessitating the deployment of innovative solutions grounded in advanced materials science [2]. Recent global assessments further underscore this urgency, according to the 2024/2025 UNEP GlobalABC Global Status Report, the buildings and construction sector contributes approximately 34–37 % of total global energy-related CO₂ emissions, making it the single largest sectoral contributor to climate change [3]. These emissions encompass not only operational carbon arising from heating, cooling, ventilation, lighting, and appliance use, but also embodied carbon embedded within material extraction, cement and steel production, transportation, and on-site construction activities. The embodied carbon component is increasingly recognized as a dominant contributor over full life cycle of high-performance buildings, as operational efficiencies improve through insulation, electrification, and renewable integration [4, 5].

This growing carbon liability situates material innovation as a central mechanism through which the construction sector can meet national and international decarbonization mandates including the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDGs 7 (Affordable and Clean Energy), 9 (Industry,

Innovation, and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities), 12 (Sustainable Consumption and Production), and 13 (Action to Combat Climate change and its Impacts), each of which identifies clean energy, sustainable cities, and responsible material use as core developmental priorities [6]. In this context, the development, characterisation, and large-scale integration of next-generation materials for green-building manufacturing constitute a strategically significant pathway toward achieving low-carbon, resource-efficient, and climate-adaptive infrastructure. Advanced material systems when designed to deliver multifunctionality, durability, and intrinsic responsiveness, offer opportunities to decouple structural performance from material intensity, reduce maintenance-driven emissions, and embed energy and sensing functionalities directly within the building fabric [7, 8]. Fig. 1 provides a schematic overview of the major classes of materials currently being advanced for green and smart buildings, illustrating how bio-based, recycled, hybrid, and smart functional materials collectively support low-carbon and multifunctional building design.

Within this emerging smart-building paradigm, materials assume a foundational role by serving simultaneously as load-bearing elements, functional interfaces, and active transducers of energy and information. Unlike conventional construction materials, next-generation material systems are engineered to exhibit intrinsic responsiveness to thermal, mechanical, electrical, and environmental stimuli, enabling building components to sense, adapt, and respond without reliance on external devices [9, 10]. This material-centricity is achieved through the development of smart and multifunctional materials that integrate thermal regulation, energy harvesting, sensing, and actuation capabilities directly within the building fabric.

Beyond the classical sustainability discourse centered on embodied-carbon reduction and resource efficien-

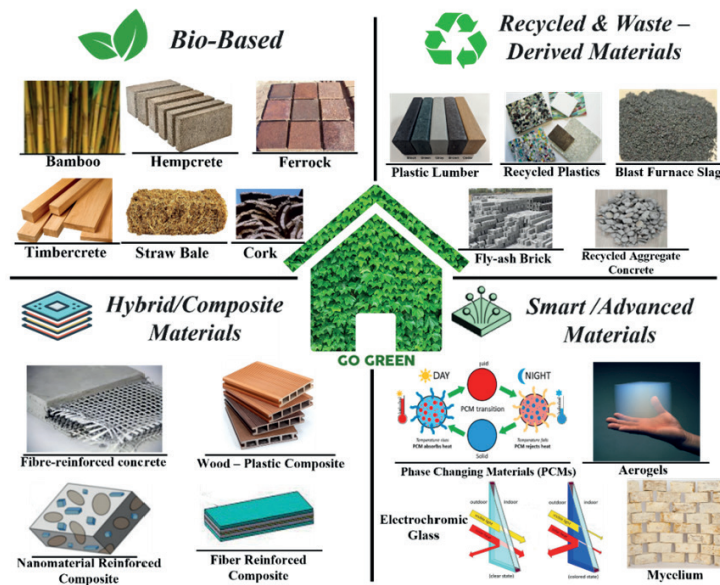


Fig. 1. Sustainable Materials used for construction of Green Buildings

cy, the conceptualisation of “smart buildings” introduces a multifaceted framework wherein materials are not merely passive structural entities but active participants in environmental interaction, energy modulation, and autonomous adaptation [11]. The contemporary smart-building definitions emphasise a coupled cyber-physical-material architecture in which structural components exhibit thermophysical adaptivity, decentralised energy transduction, real-time sensing, damage detection, and autonomic functional reconfiguration. These capabilities derive not from mechanical or electrical subsystems alone but increasingly from the intrinsic functionalities embedded within advanced material systems. The transition from passive to intelligent material fabrics represents a critical frontier in achieving high-performance, net-zero and climate-resilient building technologies [12]. This paradigm shift transcends conventional construction by embedding multifunctional materials and responsive components that interact synergistically with building management systems (BMS), thereby enabling dynamic control over thermal, lighting, structural, and air quality parameters [13].

MATERIALS AND METHODS

In this context, this review paper discusses the next-generation smart and multifunctional materials as enablers of green, smart, and climate-resilient buildings. The review examines key material classes including thermal-adaptive materials, architected mechanical metamaterials, and energy-harvesting functional composites with emphasis on material composition, microstructural design, and geometry-governed behaviour enabling thermal regulation, mechanical adaptability, energy transduction, and self-sensing within structural and envelope components. It also discusses how intrinsic material functionalities such as thermophysical adaptivity, energy transduction, self-sensing can be embedded directly

within structural and envelope components, thereby reducing dependence on auxiliary mechanical or electrical subsystems.

RESEARCH RESULTS

Smart and Multifunctional Materials for Sustainable Buildings

Thermal-Adaptive Smart Materials

Thermal-adaptive smart materials constitute a core functional class in smart and sustainable buildings by enabling dynamic regulation of heat transfer, solar gain, and thermal storage in response to environmental stimuli. These materials operate by reversibly modifying their thermophysical or optical properties such as thermal conductivity, heat capacity, infrared emissivity, or solar transmittance under variations in temperature, solar irradiation, or ambient conditions. Unlike conventional passive insulation systems, thermal-adaptive materials actively interact with diurnal and seasonal thermal cycles, allowing building envelopes, facades, and interior components to modulate heat flow in real time [14]. This adaptive behaviour contributes to reductions in heating and cooling loads, peak energy demand, and occupant thermal discomfort, thereby supporting low-energy and climate-resilient building operation. The integration of such materials into walls, glazing systems, roofs, and hybrid envelope assemblies enables thermal functionality to be embedded intrinsically within the building fabric, reducing reliance on mechanical systems while enhancing long-term operational efficiency and resilience.

Thermal adaptivity is increasingly extended beyond intrinsic material response through the integration of non-intrusive, data-driven recognition of human thermal adaptation into building thermal regulation strategies. W. Duan et al. demonstrated that occupants’ thermal-adaptive behaviours can be inferred in real time using vision-based

cross-modal knowledge-distillation frameworks, enabling accurate behavioural recognition with reduced computational complexity and facilitating lightweight deployment for intelligent heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) control [15]. This study demonstrates that behavioural cues can serve as reliable control signals for dynamically adjusting indoor thermal environments without invasive sensing. Complementing this approach, Y. Bai et al. developed an infrared spatiotemporal modelling framework identifying eleven representative thermal-adaptive behaviours, achieving recognition accuracies up to 95.89 % and thermal sensation prediction accuracies of 96.24 %, while maintaining robustness under variable lighting and preserving occupant privacy [16]. The study employed controlled thermal conditions of 22–25, 25–27 and 27–30 °C, with participants seated quietly for 20 min to allow thermal acclimatization prior to data acquisition and video recordings were acquired simultaneously from five viewing angles to ensure comprehensive capture of thermal-adaptive behaviours [17]. Extending thermal adaptivity to outdoor environments, H. Li et al. combined infrared thermography with behavioural monitoring to quantify relationships between pedestrian skin temperature, physiological equivalent temperature (PET), and adaptive responses, revealing stabilization of skin temperature at PET values of approximately 40–46 °C depending on activity type and identifying shading-related behaviours

as the most effective mitigation strategies under extreme heat stress [18]. Further, Li et al. demonstrated that thermal adaptivity can also be engineered at the microstructural level through photonic metal–organic frameworks exhibiting thermally enhanced luminescence, ultra-high light yield (~49,700 photons MeV⁻¹), and stability exceeding 95 % after prolonged thermal and radiation exposure [19]. Whilst microstructural engineering enables intrinsic thermal adaptivity, non-invasive thermal adaptive behavior and comfort assessment provides the system-level feedback required for smart building operation, as summarized in Table 1.

The field-based investigations further demonstrated that thermal adaptivity in buildings is governed by occupant behavior, climatic context, and passive or semi-passive control strategies. A.S. Cordero et al. reported a comprehensive field study in rural residential buildings, showing that occupants exhibit wide adaptive comfort ranges driven by long-term climatic exposure and behavioral adjustment, with neutral temperatures shifting toward higher values compared to standard comfort models [24].

Among thermal-adaptive smart materials, phase change materials (PCMs) represent one of the most effective strategies for regulating indoor thermal environments through passive heat storage and release. PCMs utilize reversible solid–liquid or solid–solid phase transi-

Table 1. Non-invasive thermal adaptive behavior and thermal comfort assessment methods

Detection Type	Detection/Sensing Tool	Prediction/Analysis Model	Thermal Metric	Key Performance Parameters	References
Facial temperature and thermal adaptive actions/infrared	Binocular infrared camera, YOLOv5, Mediapipe	Random Forest and weighted fusion with PMV	TSV (7-class, 3-class)	Accuracy: 82.86 % (7-class), 94.29 % (3-class); improved to 86.8 % (7-class) and 100 % (3-class) when adaptive actions detected	[20]
Indoor air temperature, skin temperature/ time-series	Climate chamber sensors, IVE platform	Time-series decomposition and regression on Δ-features	Thermal state, acceptability, behavioral intention	Identified trend, peak–trough timing, burst duration as dominant factors governing mismatch between IVE and real environments	[21]
Occupants’ adaptive behavior/questionnaire	Survey	Hierarchical clustering and logistic regression	Thermal acceptability, %	Window opening intensity up to 87–91 %; AC residences showed 79 % acceptability vs 70 % for NV residences	[22]
Thermal adaptive behavior/infrared video	Infrared thermography (IRT) cameras	I3D, SlowFast deep learning models	Thermal preference classification	Accuracy: 83.53 % (I3D) and 88.56 % (SlowFast) with millisecond-level inference time	[23]
Thermal adaptive behavior/wireless signals	Wi-Fi Channel State Information (CSI)	2D CNN–LSTM, 2D CNN–GRU	PTAB classification	Maximum accuracy 86 % (CNN–LSTM); optimal window size 0.5 s, step size 0.2 s	[24]

tions to absorb, store, and release large amounts of latent heat over narrow temperature intervals that coincide with human thermal comfort ranges. When integrated into building envelopes, walls, ceilings, floors, or facade assemblies, PCMs moderate indoor temperature fluctuations by attenuating peak heat gains during daytime and releasing stored thermal energy during cooler periods [25, 26]. This intrinsic thermal buffering capability reduces reliance on mechanical heating and cooling systems, mitigates peak energy demand, and enhances thermal comfort stability under diurnal and seasonal variations. Unlike conventional sensible heat storage materials, PCMs enable high energy storage density without significant temperature rise, making them particularly suitable for space-constrained building components. Their integration within construction materials, encapsulation systems, or composite layers allows thermal adaptivity to be embedded directly into the building fabric, positioning PCMs as critical materials platform for low-energy, occupant-centric, and climate-resilient building design [27].

The Fig. 2 illustrates the integration and operating mechanism of PCMs within building envelopes. The PCM layer embedded between insulation absorbs incoming heat from solar radiation and conduction during high-temperature periods, storing energy through a solid-liquid phase transition and reducing heat transfer to the interior. During cooler conditions, the stored heat is released as the PCM resolidifies.

The enthalpy temperature profile in Fig. 2, *b* highlights the latent heat plateau, enabling significant energy storage within a narrow comfort-relevant temperature range and providing effective passive thermal buffering. The total thermal energy Q stored in a PCM of melting point T_m , K is then calculated as mentioned in eq:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{pi}dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{ps}dT,$$

where in T_i is the initial temperature, K; C_{pi} is the average specific heat between T_m and T_i , T_f is the final temperature, K; C_{ps} is the average specific heat between T_f and T_m , and a_m is a fraction of the melted material.

PCMs can be embedded within concrete masonry or dispersed into finishing layers such as gypsum, plaster, or cement-based coatings, typically through microencapsulation to ensure stability and processability [28–31]. Such coating-based integration facilitates ease implementing, allows accurate regulation of PCM loading and layer thickness, and is advantageous for upgrading the thermal performance of existing buildings. In addition, PCMs can be manufactured as standalone wallboard elements, offering rapid installation and compatibility with lightweight structural systems [32, 33]. Building-scale thermal adaptivity using phase change materials can be broadly categorized into four complementary development pathways: bio-based latent heat storage, shape-stabilized or mechanically flexible PCM architectures, PCM–envelope system coupling, and solar-assisted PCM hybridization. Within the bio-based approach, M. Zor et al. demonstrated eutectic fatty-acid PCMs impregnated into wood veneers, exhibiting melting temperatures of 30 °C and latent heat storage capacities reaching 225.5 Jg⁻¹, exhibiting the suitability of renewable substrates as scalable latent heat reservoirs for low-grade thermal buffering in buildings [33]. With respect to mechanical functional systems, Y. Guo et al. developed a phase-change hydrogel incorporating sodium sulfate decahydrate, achieving a high PCM packaging efficiency of 90.4 wt. %, thermal conductivity in the range of 0.89–1.11 Wm⁻¹K⁻¹, thermally induced shape recovery within 385s, and compressive strength up to 0.67 MPa, demonstrating that PCM integration can simultaneously address leakage mitigation and mechanical robustness [34]. For using in envelopes, A. Gopalan et al. investigated PCM-assisted dynamic insulation panels, reporting 15–72 % reductions in annual radiant heat transfer and 7–38 % reductions in yearly heat loss (depending on climatic conditions and facade orientation) highlighting the amplification of PCM performance through system-level co-design (35). Extending PCM functionality to solar-energy systems, J.M. Mahdi et al. evaluated a photovoltaic–thermal (PVT) collector integrated with nano-modified PCM containing 5 % nanoparticle volumetric concentration, achieving PV cooling durations of 54–305 min through-

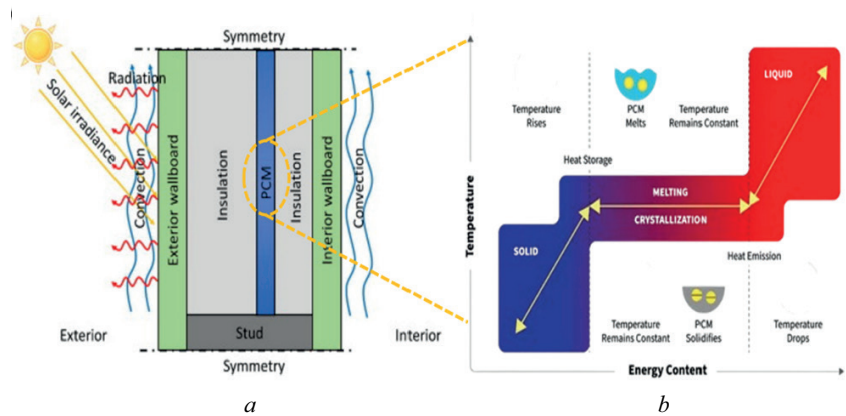


Fig. 2. Integration of PCM in Wall. Reprinted with permission from (a) [27]. Copyright 2020, Elsevier; working Principle of PCM (b). Reprinted with permission from [28]. Copyright 2022, Elsevier

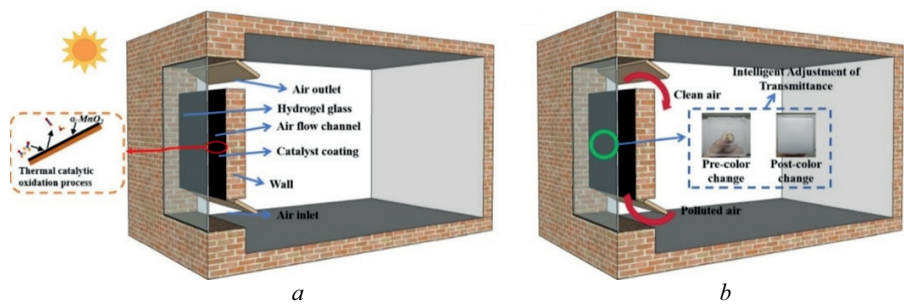


Fig. 3. Schematic of the system (a); schematic of the system operation (b). Reproduced with permission from [39]. Copyright 2025, Elsevier

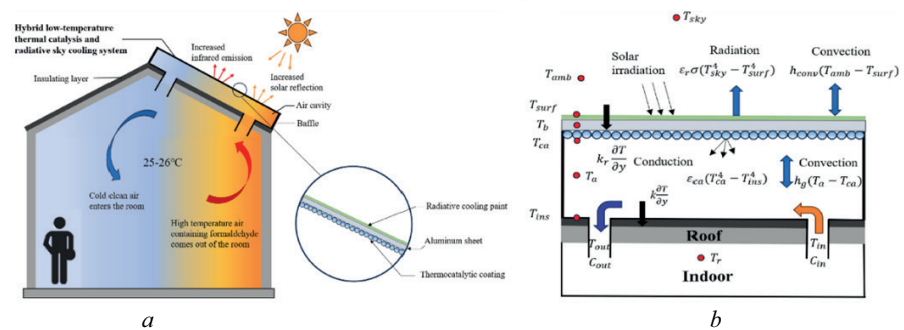


Fig. 4. Schematic of hybrid low-temperature thermal catalysis and radiative sky cooling system (a); schematic of system's heat transfer mechanism (b). Reproduced with permission from [40]. Copyright 2024, Elsevier

out the year, peak electrical output of approximately 52.5 W, and thermal power up to 225 W, demonstrating the potential of nano-enhanced PCMs to stabilize photovoltaic performance while simultaneously harvesting usable thermal energy for buildings [36]. In another study by Upadhyay et al., TiO_2 -enhanced paraffin PCMs for latent heat thermal energy storage (LHTES) systems using 0.5–2.0 wt. % nanoparticles were examined [35, 36]. The thermal conductivity increased by 35–88 %, accelerating the charging (heat storage) and discharging (heat release) processes of the PCM. At a heat transfer fluid flow rate of 0.01 kg s^{-1} , the 0.5 wt. % TiO_2 PCM improved charging, discharging, and overall LHTES efficiencies by 2.89, 5.21, and 2.25 %, respectively, as compared with pristine paraffin [37, 38].

Beyond latent heat storage alone, thermal adaptivity has also been realized through hybrid envelope systems that integrate passive thermal regulation with indoor air purification as illustrated in Fig. 3.

The catalytic Trombe wall configuration integrates thermochromic hydrogel glazing with an internal air channel coated with a catalytic layer, enabling simultaneous modulation of solar radiation and pollutant degradation. The hydrogel exhibits a temperature-driven reduction in solar transmittance from 0.9 to 0.3 within the 20–25 °C range, which suppresses excessive solar heat gains and mitigates overheating [39]. As a result, the system lowers the external wall surface temperature by up to 3.2 °C and reduces indoor air temperature by 2.5 °C compared with conventional Trombe walls. Con-

currently, the catalytic layer facilitates thermal catalytic oxidation of pollutants, achieving a 44.6 % formaldehyde removal efficiency within 70 min, thereby demonstrating the feasibility of multifunctional building envelopes that couple thermal adaptivity with indoor air quality control.

Complementarily, J. Gu et al. proposed a roof-integrated hybrid system that couples radiative sky cooling with low-temperature catalytic oxidation, as illustrated in Fig. 4, enabling continuous thermal regulation and indoor air purification under both daytime and nighttime conditions [40].

The system directs warm, polluted indoor air through an airflow channel coated with a thermocatalyst beneath a radiative cooling surface that reflects solar irradiation while emitting strongly in the infrared atmospheric window. This configuration facilitates simultaneous heat dissipation to the sky and catalytic decomposition of pollutants. Under summer ambient conditions of 35 °C, the system achieved an indoor–outdoor temperature difference of up to 5 °C and generated approximately $665.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ of purified air over a full day, demonstrating the effectiveness of integrating radiative cooling with catalytic air treatment for multifunctional thermal–environmental control at the building scale.

Architected Mechanical Metamaterials

Architected mechanical metamaterials represent a class of advanced material systems in which macroscopic mechanical behavior is governed primarily by engineered geometry, enabling unprecedented control over stiffness, deformation mode, energy absorption, and

wave propagation [41]. Unlike conventional construction materials whose properties are largely governed by composition and processing, mechanical metamaterials derive their multifunctionality from designed unit-cell architectures and hierarchical assemblies, enabling unprecedented control over stiffness, strength-to-weight ratio, deformation mode, wave propagation, and energy dissipation [42, 43]. This geometry-driven paradigm allows materials to exhibit properties that are difficult to achieve in bulk solids, including negative Poisson’s ratio, quasi-zero or negative stiffness, programmable compressibility, and tailored band-gap behavior for vibration and wave attenuation [44]. As illustrated in Fig. 5, architected mechanical metamaterials are conceived through a hierarchical design framework spanning intrinsic material constituents, unit-cell geometry, assembled structures, and device-level implementations, enabling ultralightweight behavior, ultra-high stiffness, negative mechanical response, and actively reconfigurable functionality that are relevant for smart building systems.

In the context of smart and sustainable buildings, architected mechanical metamaterials provides a transformative opportunity to decouple structural performance from material intensity, thereby enabling lightweight, multifunctional, and adaptive building components. By encoding function into geometry, metamaterials allow a single structural element to simultaneously serve load bearing, vibration-mitigation, sensing, and energy-harvesting roles. This capability is relevant for next-generation buildings, where structural components are expected to interact with cyber-physical building systems, respond to environmental stimuli, and contribute actively to resilience and energy efficiency rather than acting as passive supports [46]. At the building scale, distinct classes of architected metamaterials offer application-specific advantages depending on their deformation mechanisms and geometric programmability. Origami-inspired metamaterials, characterized by foldable and deployable architectures, are particularly well suited for adaptive façades, reconfigurable shading devices, and responsive building

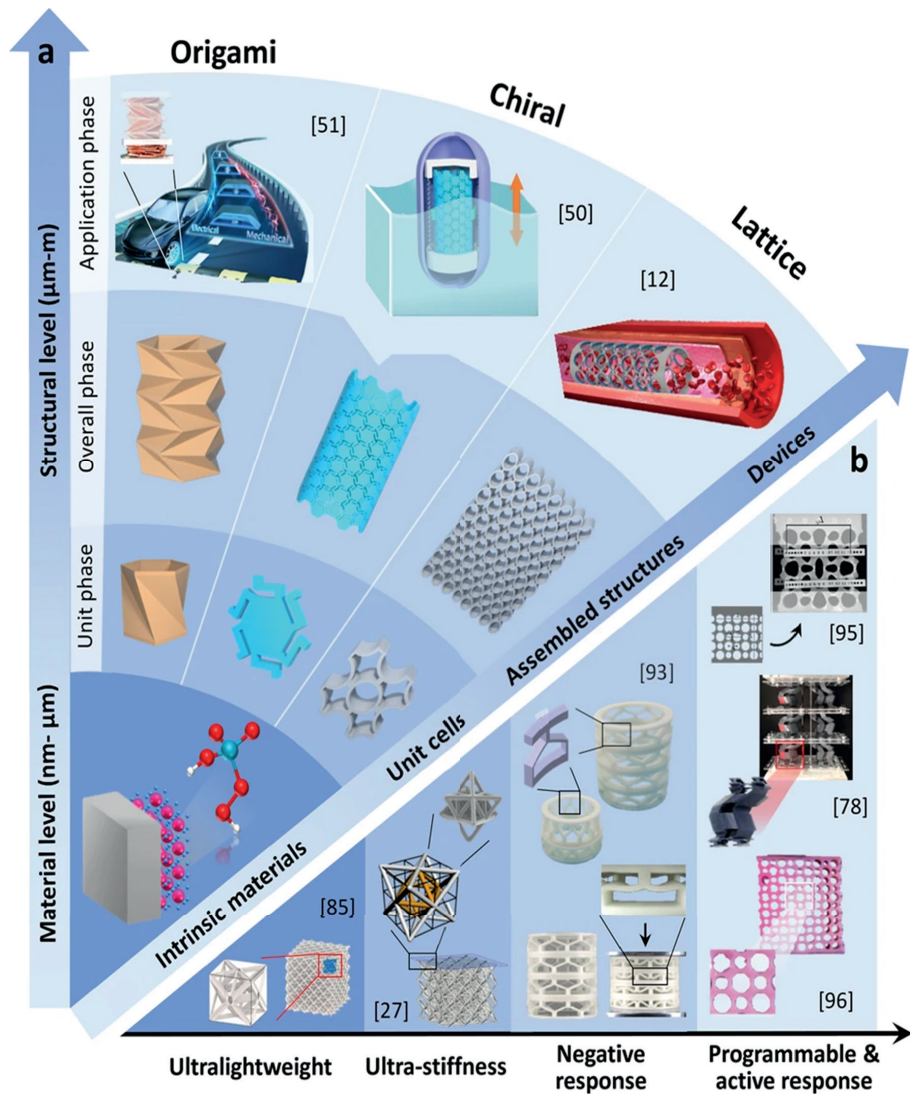


Fig. 5. Categories of Metamaterials from Material to Structural level (a); properties of Metamaterials (b). Reprinted with permission from [45]. Copyright 2023, Wiley

envelopes, where large, reversible shape transformations enable dynamic regulation of daylight, ventilation, and thermal exchange. Chiral and auxetic metamaterials, exhibiting rotational deformation mechanisms and negative Poisson's ratio behaviour, provide enhanced shear resistance, energy dissipation, and fracture tolerance, rendering them attractive candidates for seismic cores, impact-resistant walls, and vibration-mitigating structural elements. In contrast, periodic lattice and cellular metamaterials, including octet truss and triply periodic minimal surface (TPMS) architectures, offer exceptionally high stiffness-to-weight ratios and tunable damping characteristics, enabling lightweight load-bearing floors, adaptive slabs, vibration-isolating platforms, and multifunctional structural components [47].

From a systems perspective, architected mechanical metamaterials can be strategically integrated into structural, foundation, envelope, and interior subsystems of smart buildings. In structural and foundation systems, periodic and locally resonant metamaterial architectures enable attenuation of low-frequency vibrations and seismic waves through the formation of frequency band gaps, offering an alternative or complement to conventional base-isolation techniques. Unlike traditional isolation systems which often suffer from large displacements or limited effectiveness against vertical motion, metamaterial foundations can be designed to target dominant seismic frequencies while preserving load-bearing capacity and structural integrity [48]. A prominent example is the development of seismic metamaterial foundations, where periodic or locally resonant structures are embedded beneath building superstructures to attenuate both horizontal and vertical seismic waves. Y. Jiang et al. experimentally validated a scaled metamaterial foundation (MMF)

for a multi-storey building as exhibited in Fig. 6, demonstrating effective vibration attenuation in ultra-low-frequency regimes (<10 Hz) without compromising structural stability [49].

The attenuation arises from geometry-induced band gaps and local resonance effects, as evidenced by the dispersion characteristics shown in figure, rather than from added material damping or mass. Despite this strong vibration-filtering capability, the metamaterial foundation preserved adequate load-bearing capacity and structural stability, thereby confirming the practical feasibility of metamaterial-based seismic protection strategies for real civil infrastructure. In building envelopes and interior systems, architected lattices and cellular metamaterials provide enhanced vibration isolation, acoustic attenuation, and impact resistance while significantly reducing structural mass. Such characteristics are particularly beneficial for high-rise buildings, prefabricated floor panels, façade elements, and floating floors, where vibration comfort and noise control are critical performance metrics. Moreover, the ability to tune stiffness and damping through unit-cell design enables adaptive responses to changing occupancy, loading conditions, and environmental stimuli [42, 50]. J. Shi et al. introduced a metaconcrete backfill system incorporating locally resonant inclusions within a cementitious matrix to suppress ground-borne vibrations. The experimental results demonstrated significant attenuation of traffic- and rail-induced vibrations in the 5–30 Hz range, achieving subwavelength vibration isolation that is not attainable using traditional trenches or piles. This approach offers a scalable solution for vibration-sensitive smart buildings located in dense urban corridors [51]. In another study, Alavi established a foundational framework po-

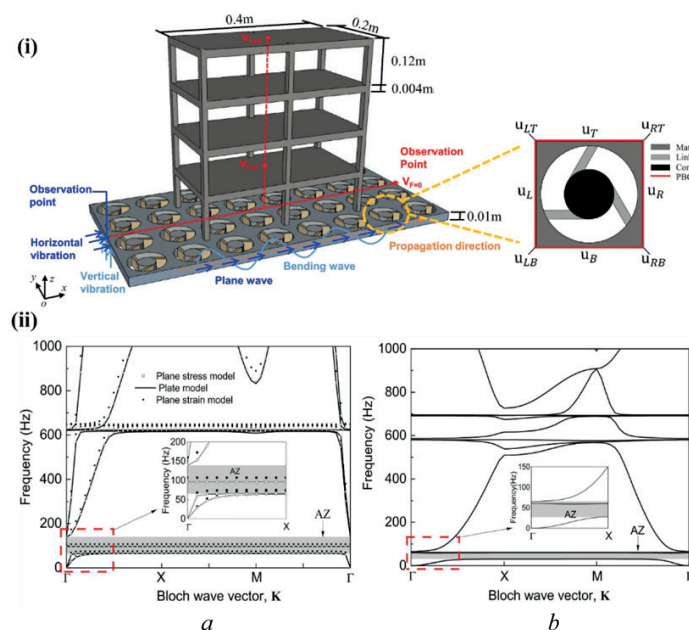


Fig. 6. MMF-frame model under plane- and bending-waves incident with unit cell subjected to periodic boundary condition (i); dispersion curves of (ii) (a); plane waves and (b) bending waves. Reprinted with permission from [49]. Copyright 2025, Elsevier

sitioning mechanical metamaterials as intelligent civil infrastructure, showing that architected cementitious and lattice-based systems achieved 20–40 % reductions in material density while retaining compressive strength within ~10 % of conventional concrete, corresponding to specific strength values exceeding $0.08 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, significantly higher than those of traditional construction materials. This geometry-induced efficiency enabled seismic damping, vibration isolation functionalities to be integrated within load-bearing systems.

Beyond mechanical functions, architected metamaterials also serve as enabling platforms for multifunctional integration. By embedding smart material phases such as piezoelectric, triboelectric, or magneto-responsive elements within architected frameworks, structural components can function as distributed sensors, actuators, and energy harvesters. This integration supports self-powered structural health monitoring, real-time feedback, and interaction with building management systems, thereby reinforcing the role of metamaterials within cyber–physical–material building architectures [52]. R. Hamzehei et al. reported multifunctional 3D-printed sinusoidal mechanical metamaterials that combine quasi-zero stiffness (QZS) vibration isolation with integrated energy harvesting, enabling self-powered components for smart buildings [52]. The lattices were fabricated from thermoplastic polyurethane (TPU) for reversible buckling of sinusoidal struts to achieve QZS behavior and effective vibration isolation for excitation frequencies above ~15 Hz, where transmissibility dropped below unity. A piezoelectric bimorph actuator positioned in high-strain lattice regions produced peak voltages of ~3 V and power densities of $600\text{--}700 \text{ } \mu\text{Wg}^{-1}$ at 15 Hz. Additionally lead zirconate titanate (PZT) patches mounted on a semi-honeycomb support generated ~500 mV with power densities approaching $800 \text{ } \mu\text{Wg}^{-1}$ at ~90 Hz, sufficient to power low-energy wireless sensors, demonstrating the feasibility of self-sustained vibration isolation and structural health monitoring in next-generation smart buildings. At the material-system level, Barri et al. developed nano-generator-integrated metamaterial concrete, embedding auxetic polymer lattices within a conductive cementi-

tious matrix [53]. The resulting composites achieved up to 15 % reversible compressibility under cyclic loading while delivering a peak electrical power output of approximately $330 \text{ } \mu\text{W}$, enabling simultaneous load-bearing, energy harvesting, and self-powered sensing. These geometry-driven material classes enable the rational tailoring of mechanical performance at architectural scales, supporting the integration of adaptability, resilience, and multifunctionality within next-generation smart and sustainable building systems.

Energy-Harvesting and Smart Functional Composites

Energy-harvesting functional composites are emerging as a critical materials platform for net-zero and climate-resilient buildings, as they convert ubiquitous building excitations like ambient vibrations, cyclic service loads, footfall, façade/wind-induced oscillations, and thermal gradients into usable electrical energy while simultaneously enabling self-powered sensing and structural intelligence [54–56]. Unlike conventional renewable energy systems such as rooftop photovoltaics or external energy storage units, these material systems embed energy transduction mechanisms directly within the building fabric, enabling distributed, decentralised, and maintenance-free power generation while preserving structural integrity [57]. This paradigm shift transforms buildings from passive energy consumers into energy-active infrastructures, capable of harvesting ambient mechanical, thermal, and environmental stimuli inherent to the built environment [58].

As illustrated in Fig. 7, energy-harvesting and smart functional composites can be strategically integrated into floors, foundations, walls, facades, and roof systems, where they harvest mechanical and thermal energy generated during routine building operation [59]. The locally generated electrical output is utilised to power distributed sensor nodes for structural health monitoring, vibration tracking, occupancy detection, and environmental sensing, enabling continuous data acquisition without reliance on external power infrastructure. When coupled with conductive or self-sensing composite matrices, these systems further support real-time detection of strain evolution, crack initiation, and damage accumulation [60].

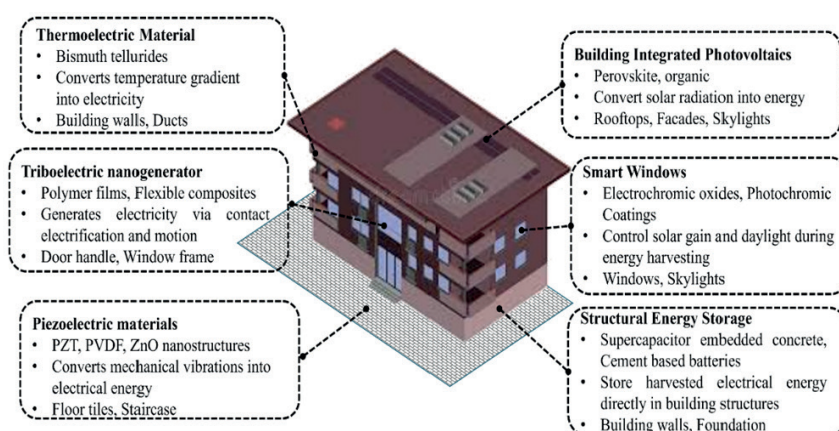


Fig. 7. Integration of Smart Materials into different Components of a Building

This decentralised, material-embedded energy and sensing architecture transforms the building from a passive energy consumer into an energy-active, information-rich system, capable of predictive maintenance, adaptive response, and enhanced operational resilience. Such material-centric intelligence underscores the pivotal role of energy-harvesting functional composites in next-generation green buildings, where sustainability, durability, and smart functionality are co-designed at the material level. In a study by H.B. Birgin et al., the eco-earth cement composite reinforced with carbon microfibers integrating strain-sensing functionality into sustainable construction materials was studied [60]. By partially replacing cement and introducing carbon microfibers near the electrical percolation threshold (0.025–0.25 wt. %), the composite achieved gauge factors exceeding 100 while maintaining adequate mechanical integrity for non-load-bearing and low-rise building applications, highlighting multifunctionality embedded at the material level, reducing environmental footprint while enabling real-time structural monitoring.

Further, in a study by M. Ergün et al., a smart reinforced concrete (RC) building was numerically modelled using finite element (FE) analysis and instrumented with piezoelectric sensor locations, with the numerical framework validated through a corresponding experimental setup as shown in Fig. 8 [61].

The structure was subjected to realistic service-level live loads representing occupants and furniture, as well as seismic excitations applied in the vertical direction to simulate earthquake-induced vibrations. The experimentally measured vibration responses showed strong agreement with FE predictions for an initial displacement of 18 mm, demonstrating accurate capture of the system’s dynamic characteristics. A similar correspondence was observed at a higher initial displacement of 28 mm, confirming the robustness of the numerical model in

predicting vibration behavior and energy-harvesting-relevant responses under varying excitation intensities.

In a study by W. Thongthapthai et al., a portland cement (PC) and natural rubber (NR) based triboelectric nanogenerator (PC/NR-SL-T TENG) positioned as a smart energy floor for harvesting biomechanical excitations (walking, running, crowd-induced vibrations) was developed [61]. Within 1–10 Hz, the peak-to-peak voltage (V_{pp}) increased from 46 V (1 Hz) to 242 V (10 Hz), evidencing a strong frequency-mediated amplification relating to real ambient excitation spectra in built environments. The power density reached 3.27 W/m² at 5 N and 5 Hz, which is ~11 times higher than pristine PC TENG (0.29 W/m²). The floor is further reinforced by capacitor having charging capability (10–47 μ F) under 5 N and 5 Hz via a rectifier circuit, indicating feasibility for intermittent powering or buffering strategies in self-powered sensing nodes. In a similar study, He et al. targeted the long-standing moisture sensitivity of wood-based triboelectric systems by engineering an all-wood-based TENG (AW-TENG) using treated wood as the friction layer and compressed-carbonized wood as the electrode, thereby enhancing hydrophobicity and conductivity through processing [63, 64]. Under a high-humidity environment (80 % RH), the optimized AW-TENG achieved open circuit voltage V_{oc} = 50.85 V and short circuit current I_{sc} = 0.72 μ A. In contrast to cementitious TENG floors, the AW-TENG route leverages biomass engineering and wood-electrode carbonization addressing environmental robustness. Further, E. Keel et al. reported a high-output TENG based on 3D graphene foam (3DG)/PET, where the graphene surface exhibited a hydrophobic contact angle of 138.52° and a surface roughness of 2.4 ± 0.5 μ m, both contributing to enhanced charge generation and reduced interfacial adhesion. The 3DG-based device delivered an open-circuit voltage of 400 V, a short-circuit current of 105.7 μ A, and an output

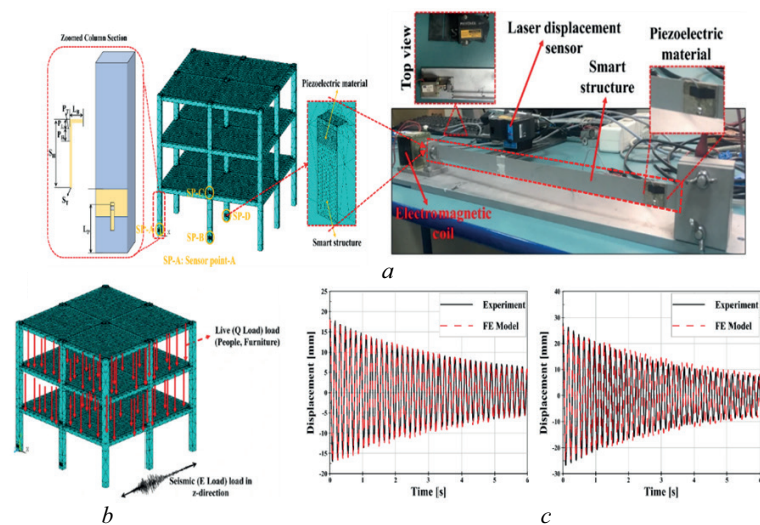


Fig. 8. FE model and sensor locations of smart RC building along with its experimental setup (a); live and Seismic loads (b); experimental and simulation vibration responses at a 18 mm and b 28 mm respectively (c). Reprinted with permission from [62]. Copyright 2025, Springer

power density of 10,372 mWm⁻² at 3 Hz with a 40 MΩ load resistance.

In complementary to floor-based harvesting, roof-integrated triboelectric systems have been explored for capturing rainfall-induced mechanical energy. In a study by Dai et al., a droplet energy harvester (DEH) was evaluated on roofs with varying inclination angles and architectural geometries [54]. For inclined roofs, the instantaneous peak power per droplet decreased sharply with increasing tilt angle, from 81.6 μW at 100° to 0.42 μW at 180°, highlighting the role of impact dynamics and sliding behavior. For different roof morphologies, the DEH generated 12.14 μW on a classical roof, 146.6 μW on a dome-shaped roof, and 86.3 μW on a tower-type roof, demonstrating that architectural curvature significantly influences energy harvesting efficiency. Under simulated rainfall, a 4.7 μF capacitor was charged to 1.0, 0.4 and 0.2 V at flow rates of 9, 45, and 64 mLs⁻¹, respectively. The Table 2 compares TENG based on different materials as a triboelectric layer.

Further, yarn-based smart cement composites incorporating braided core sheath triboelectric yarns embedded directly within Portland cement have demonstrated that structural reinforcement, mechanical energy harvesting, and self-powered sensing can be achieved simultaneously [74]. Through controlled modification of yarn surface morphology, triboelectric output voltages were enhanced by more than 120 %, while full-scale pavement implementations achieved 100 % accuracy in vehicle classification, speed detection, and pedestrian recognition when coupled with wireless data transmission and deep-learning algorithms. Complementary to yarn-reinforced cement, conductive cement-based composites incorporating carbon fillers near the electrical percolation threshold further enable cement to function as a structural energy material. These systems support contact-electrification-driven triboelectric energy harvesting from wind, biomechanical motion, while also functioning as structural capacitors

capable of local energy storage. Yuan et al. investigated geopolymer-based thermoelectric composites as infrastructure-native energy materials for buildings [74]. By incorporating conductive fillers, the geopolymer exhibited a Seebeck coefficient of up to 1,092 μV K⁻¹ at 293 K and a maximum power factor of 0.84 μWm⁻¹K⁻², while maintaining compressive strength of 33.4 MPa.

In another study, Ra et al. studied a cement-based conductive composite triboelectric nanogenerator (CBC-TENG) integrated into a net-zero energy structure, as illustrated in the Fig. 9 showing wall (wind), floor (human motion), and roof (raindrop) harvesting modes [12]. The wall-mounted CBC-TENGs under wind, generated a continuous rectified output voltage of ~5 V, whereas floor-integrated CBC-TENGs harvested biomechanical energy via solid–solid contact electrification during repeated stepping, producing stable alternating outputs after rectification. Roof-mounted CBC-TENGs, operating through liquid–solid contact electrification, generated voltages from deionized water droplets at 1 Hz and 65° roof inclination, with output voltage increasing systematically with droplet frequency. Beyond cementitious materials, C. Prouskas et al. proposed a U-shaped light-trapping dye sensitized solar cell (DSSC) architecture designed for outdoor operation [75]. The geometry redistributes incident sunlight onto vertically mounted DSSCs via internal reflection, effectively reducing local irradiance and limiting photo-degradation. The configuration enabled a fill factor increase to ~96 % under outdoor illumination, while maintaining electrical energy generation comparable to conventional vertically irradiated DSSCs. Apart from photovoltaic envelopes, Fu et al. developed thermotropic ionic hydrogel smart windows that couple adaptive solar regulation with thermoelectric energy harvesting [76]. The hydrogel exhibited a reversible phase transition near 26 °C, enabling high luminous transmittance (>90 %) below the transition temperature and strong solar modulation (≈80 %) above it. Simulta-

Table 2. Comparison of TENG based on different materials as a triboelectric layer

Materials		Properties			References
Electronegative	Electropositive	Open Circuit Voltage V_{oc} , V	Short circuit current I_{sc} , μA	Output power density P_{out} , mW/m ²	
Polyimide	Laser Induced Graphene	3,500	60	2,361	[65]
Graphite	Crumpled Graphene	15	–	15	[66]
PDMS	CNT	383	25	8,000	[67]
Polyethylene terephthalate	Silk Fibroin Films	213.9	0.34	68	[68]
PDMS	Shear Exfoliated Graphene	233	0.731	131.4	[69]
Polyethylene terephthalate	3D Graphene	400	105.7	10,372	[70]
PLA	Gelatin	500	16	5,000	[71]
Nitrocellulose paper	Weighing paper	360	250	–	[72]
Carbon-filled PVDF	Nylon-6	1.4	6	19.7	[73]

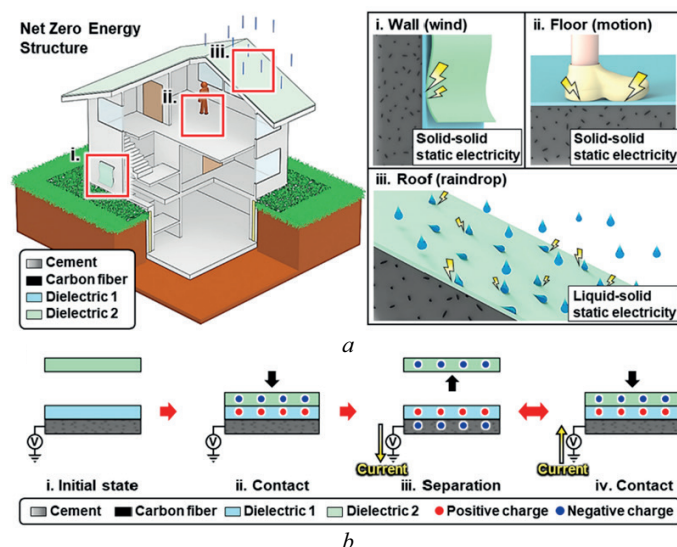


Fig. 9. Conceptual schematic of a net-zero-energy residential system illustrating the integration of CBC-based structural components capable of harvesting multiple ambient renewable energy sources (a); including wind-induced energy (i); biomechanical energy generated by human activity (ii); and raindrop-induced energy (iii); schematic representation of the contact-electrification-driven energy harvesting mechanism enabled through the incorporation of CBC (b). Reprinted with permission from [12]. Copyright 2021, Elsevier

neously, the temperature-gradient-driven ionic transport generated a pronounced thermoelectric response, with a seebeck coefficient of 39.03 mVK^{-1} , a power factor of $0.838 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$, and an areal energy density up to 250 mJm^{-2} , demonstrating multifunctional window elements for smart buildings.

Future Scope

The advancement of green and smart building technologies requires a transition from single-function construction materials toward intrinsically multifunctional, adaptive, engineered material systems capable of sustaining performance under severe conditions. The development of hybrid smart materials integrating thermal regulation, mechanical resilience, self-sensing, and energy transduction within a unified material framework would reduce interfacial complexity and enhance functional synergy. Such materials require advanced composite architectures in which latent heat storage phases, conductive networks, and stimuli-responsive polymers coexist without adverse cross-coupling effects. Further, the design of fatigue-resistant and self-stabilizing material chemistries leveraging dynamic covalent bonding, supramolecular interactions, or reversible crosslinking mechanisms is critical for sustaining functional integrity under prolonged cyclic thermal and mechanical loading. Architected mechanical metamaterials should advance toward geometry-programmable systems capable of adaptive stiffness modulation, vibration attenuation, and reconfigurable energy dissipation through material phase transitions or stress-induced instabilities. In addition, the emergence of energy-active structural materials, where cementitious, polymeric, or bio-derived matrices embedded with triboelectric, piezoelectric, or thermoelectric phases function simultaneously as load-bearing

components and distributed energy harvesters is critical. The smart materials must also exhibit environmental robustness, maintaining stable functional responses under humidity, ultraviolet radiation, and temperature extremes through encapsulation and surface-engineering strategies. The materials should be bio-inspired and lifecycle-engineered material systems that combine hierarchical design, intrinsic self-sensing capability, and recyclability, enabling buildings to evolve into energy-active, information-rich, and sustainable infrastructures rather than passive structural assemblies.

CONCLUSION

Smart and green buildings have emerged as a central component of global strategies aimed at mitigating climate change, reducing resource consumption, and improving the resilience and livability of the built environment. As buildings transition from static energy consumers to adaptive and performance-driven systems, advanced materials play a decisive role in enabling this transformation. This review has examined next-generation smart and multifunctional materials that support the development of intelligent, low-carbon, and climate-resilient buildings. Material systems such as architected mechanical metamaterials and energy-harvesting functional composites demonstrate the essential functions of a building including thermal regulation, vibration mitigation, energy conversion, sensing, and adaptive response, which can be intrinsically embedded within structural and envelope components. By leveraging material composition, microstructural design, and geometry-governed behavior, these systems enable functionality to emerge directly from the material rather than through external subsystems. The growing integration of respon-

sive and self-sensing materials further strengthens this paradigm by enabling condition awareness, functional adaptability, and performance stability under dynamically varying environmental and occupancy conditions. The continued advancement in material design and performance is improving reliability and supporting

alignment with building-scale requirements. These developments position smart materials as key enablers for constructing buildings as adaptive, energy-active, and intelligent systems capable of contributing meaningfully to long-term sustainability, climate resilience, and human-centric performance.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Firoozi A.A., Firoozi A.A., Oyejobi D.O., Avudaiappan S., Flores E.S. Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*. 2024; 24:103521. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103521
2. Kurdi A., Almoatham N., Mirza M., Ballweg T., Alkahlan B. Potential Phase Change Materials in Building Wall Construction : a Review. *Materials*. 2021; 14(18):5328. DOI: 10.3390/ma14185328
3. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. *UNEP — UN Environment Programme*. 2025. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
4. Jain H., Dhupper R. Holistic strategies for sustainable buildings and their impacts on soil and environmental health. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2026; 11(1). DOI: 10.1007/s41024-025-00688-4
5. Kallayil A., Patadiya J., Kandasubramanian B., Adamtsevich A., Kchaou M., Aldawood F.K. Adaptive Smart Materials in Architecture: Enhancing Durability and Sustainability in Modern Construction. *ACS Omega*. 2025; 10(22):22305–22322. DOI: 10.1021/acsomega.4c04943
6. The 17 Goals. *Sustainable Development*. 2025. URL: <https://sdgs.un.org/goals>
7. De Araujo V., Mascarenhas F., Laleicke F., Kutnar A., Dias A., van de Kuilen J. et al. Biocities with wood and bamboo: A path to low-carbon urbanization for greener societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026; 226:116257. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116257
8. Kim M.S., Kim E.S. Moss-based building greening: A review on enhancing sustainability of concrete cityscapes. *Ecological Engineering*. 2026; 223:107826. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107826
9. Dhayal K.S., Agrawal S., Agrawal R., Kumar A., Giri A.K. Green energy innovation initiatives for environmental sustainability: current state and future research directions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31(22):31752–31770. DOI: 10.1007/s11356-024-33286-x
10. Patadiya J., Kandasubramanian B., Sreeram S., Patil P.D., Mujawar R., Indalkar A. et al. Strategic Implementation of Multimaterial Additive Manufacturing: Bridging Research and Real-World Applications. *ACS Omega*. 2025; 10(14):13749–13762. DOI: 10.1021/acsomega.4c11279
11. Abera Y.A. Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials*. 2024; 33. DOI: 10.1177/26349833241255957
12. Ra Y., You I., Kim M., Jang S., Cho S., Kam D. et al. Toward smart net zero energy structures: Development of cement-based structural energy material for contact electrification driven energy harvesting and storage. *Nano Energy*. 2021; 89:106389. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106389
13. Krueger K., Stoker A., Gaustad G. “Alternative” materials in the green building and construction sector. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2019; 8(4):270–291. DOI: 10.1108/sasbe-09-2018-0045
14. Peri G., Cirrincione L., Mazzeo D., Matera N., Scaccianoce G. Building resilience to a warming world: A contribution toward a definition of “Integrated Climate Resilience” specific for buildings : Literature review and proposals. *Energy and Buildings*. 2024; 315:114319. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114319
15. Duan W., Yuan W., Shen D., Liu X., Wang Yu. Thermal Adaptive Behavior-Recognition Model with Cross-Modal Knowledge Distillation. *New Technologies on Building Energy Saving and Housing Thermal Comfort*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/22/4071>
16. Bai Y., Lv C., Liu L. Spatiotemporal modeling of infrared thermal adaptive behavior recognition for personal thermal comfort prediction. *Energy and Buildings*. 2025; 348:116406. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116406
17. Lu X., Liu J., Wang S., Teng Y., He Y., Su Y. et al. Infrared thermography-based behavior recognition: pedestrian skin temperature and thermal adaptive behaviors in outdoor activities for thermal comfort analysis. *Building and Environment*. 2026; 289:114075. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.114075
18. Li H., Dong Q., Li Y., Hu E., Cai Yu., Zhang L. et al. Thermal-Adaptive Photonic MOFs for High-Performance X-ray Scintillator. *Advanced Functional Materials*. 2025. URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adfm.202500445>
19. Li K., Liu F., Luo Y., Khoso M.A. Non-Invasive Multivariate Prediction of Human Thermal Comfort Based on Facial Temperatures and Thermal Adaptive

Action Recognition. *Energies*. 2025; 18(9):2332. DOI: 10.3390/en18092332

20. Rentala G., Zhu Y., Mukhopadhyay S. Application of time series analysis to improve the validity of Immersive virtual environments for collecting occupant thermal state and adaptive behavioral intention data. *Advanced Engineering Informatics*. 2024; 61:102449. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102449

21. Apriliyanthi S.R., Sakoi T., Nakaya T., Kubota T., Koerniawan M.D., Alfata M.N. F. et al. Occupants' Thermal Adaptive Behavior Pattern in Indonesian Residential Buildings. *Buildings*. 2025; 15(1):86. DOI: 10.3390/buildings15010086

22. Li H., Liu Y., Wu H., Lin B., Lei L., He J. Thermal preference prediction through infrared thermography technology: Recognizing adaptive behaviors. *Building and Environment*. 2024; 262:111829. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111829

23. Xu M., Han Y., Zhu N., Yang B. A method for recognizing individual dynamic thermal adaptations using wireless signals. *Energy and Buildings*. 2025; 333:115448. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115448

24. Cordero A.S., Melgar S.G., Márquez J.M.A. Validation of Dynamic Natural Ventilation Protocols for Optimal Indoor Air Quality and Thermal Adaptive Comfort during the Winter Season in Subtropical-Climate School Buildings. *Applied Sciences*. 2024; 14(11):4651. DOI: 10.3390/app14114651

25. Zhang Y., Ma G., Wu G., Liu S., Gao L. Thermally adaptive walls for buildings applications: A state of the art review. *Energy and Buildings*. 2022; 271:112314. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112314

26. Abdel-Rahman O., Roubay E., Afify M.M. Thermal performance evaluation of phase changing materials in double glazing units for office buildings in Egypt. *Scientific Reports*. 2025; 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-88206-x

27. Kishore R.A., Bianchi M.V.A., Booten C., Vidal J., Jackson R. Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings. *Energy and Buildings*. 2020; 226:110355. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110355

28. Hekimoğlu G., Sari A. A review on phase change materials (PCMs) for thermal energy storage implementations. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 58:1360-1367. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.231

29. Kulkarni P., Muthadhi A. Improving thermal and mechanical properties of light weight aggregate concrete using inorganic phase changing material, expanded clay aggregate, alccofine1203 and manufacturing sand. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021; 6(2). DOI: 10.1007/s41062-021-00460-w

30. Hamid H., Chorzepa M.G. Quantifying maximum temperature in 17 mass concrete cube specimens made with mixtures including metakaolin and/or slag. *Construction and Building Materials*. 2020; 252:118950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118950

31. Mahdaoui M., Hamdaoui S., Ait Msaad A., Kousksou T., El Rhafiki T., Jamil A. et al. Building bricks with phase change material (PCM): Thermal performances. *Construction and Building Materials*. 2021; 269:121315. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121315

32. Zou W., Wang Z., Sun Z., Jiang X., Yu M., Song L., et al. A thermochromic wood that can change colour at 24–40 °C and collect heat for heating flooring. *Industrial Crops and Products*. 2022 186:115293. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115293

33. Zor M., Li J., Şen F., Can A., Wang X. Rodriguez D. et al. Characterization of phase-changing materials as stabilized thermal energy storage in impregnated biomaterial. *Journal of Industrial Textiles*. 2025; 55. DOI: 10.1177/15280837241306131

34. Guo Y., Guo X., Yin X., Zhang X., Hu S., Zhang Y. et al. Thermally driven memory flexible phase change hydrogel for solar energy efficient building thermal management. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2025; 279:113248. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113248

35. Gopalan A., Antony A.S.M., Suresh R., Sahoo S., Livingston L.M.M., Titus A. et al. Performance enhancement of building energy through the combination of dynamic insulation panels and phase changing materials. *Energy Reports*. 2022; 8:945-958. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.10.281

36. Mahdi J.M., Al-Najjar H.M.T., Togun H., Biswas N., Boujelbene M., Alshammari S. et al. Year-round performance evaluation of photovoltaic-thermal collector with nano-modified phase-change material for building application in an arid desert climate zone. *Energy and Buildings*. 2024; 320:114597. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114597

37. Upadhyay V.V., Singhal S., Pandey A. Enhancing latent heat thermal energy storage efficiency: thermal performance analysis of phase change material enriched with TiO₂ nanoparticles. *Engineering Research Express*. 2025; 7(2):025546. DOI: 10.1088/2631-8695/add8e3

38. Wu H., Zhang G., Li J., Wang W., Li N., Ji J. et al. A catalytic Trombe wall with thermochromic hydrogel: experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2025; 278:127454. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127454

39. Xu F., Che L., Zhang G., Cao X., Li N., Song G. et al. A novel hybrid low-temperature thermal catalysis and radiative sky cooling system for day and night air purification and cooling. *Energy*. 2024; 313:133795. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133795

40. Gu J., Zhao W., Zeng C., Liu L., Leng J., Liu Y. Construction of mechanical metamaterials and their extraordinary functions. *Composite Structures*. 2025; 356:118872. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.118872

41. Jiao P., Alavi A.H. Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: advent and future trends. *International Materials Reviews*. 2021; 66(6):365-393. DOI: 10.1080/09506608.2020.1815394

42. Gupta S., Gnanamoorthy R., Kandasubramanian B. Additive manufacturing of topology optimized multi-functional cellular framework for enhanced energy absorption. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025; 10(11):8865-8893. DOI: 10.1007/s40964-025-01190-6
43. Bechthold M., Weaver J.C. Materials science and architecture. *Nature Reviews Materials*. 2017; 2(12). DOI: 10.1038/natrevmats.2017.82
44. Jiao P., Mueller J., Raney J.R., Zheng X., Alavi A.H. Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications*. 2023; 14(1). DOI: 10.1038/s41467-023-41679-8
45. Alavi A.H. Metamaterials Break the Constraints of Traditional Civil Infrastructure. *Advanced Materials*. 2025; 38(6). DOI: 10.1002/adma.202518198
46. Lu C., Hsieh M., Huang Z., Zhang C., Lin Y., Shen Q. et al. Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials : a Review. *Engineering*. 2022; 17:44-63. DOI: 10.1016/j.eng.2021.12.023
47. Pishvar M., Harne R.L. Foundations for Soft, Smart Matter by Active Mechanical Metamaterials. *Advanced Science*. 2020; 7(18):2001384. DOI: 10.1002/advs.202001384
48. Huang J., Chen R., Zhang Z., Liu G., Borjigin S., Scarpa F. Seismic metamaterials as foundations for buildings subjected to incident plane and bending waves: Simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025; 343:121187. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121187
49. Jiang Y., Wang Q. Highly-stretchable 3D-architected Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports*. 2016; 6(1). DOI: 10.1038/srep34147
50. Shi J., Cao Z., Xiao L., Lu H. A novel metaconcrete barrier as backfill of foundation pit to mitigate ground-borne vibration. *Transportation Geotechnics*. 2025; 55:101666. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101666
51. Wang H., Zhao S., Xu C., Sun K., Fan R. Engineering Metamaterials for Civil Infrastructure: From Acoustic Performance to Programmable Mechanical Responses. *Materials*. 2025; 18(17):4032. DOI: 10.3390/ma18174032
52. Hamzehei R., Varnosfaderani M.A., Bodaghi M., Wu N. 3D-printed multi-functional sinusoidal metamaterials for simultaneous vibration isolation and electricity generation. *Engineering Structures*. 2025; 345:121496. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121496
53. Barri K., Zhang Q., Kline J., Lu W., Luo J., Sun Z. et al. Multifunctional Nanogenerator-Integrated Metamaterial Concrete Systems for Smart Civil Infrastructure. *Advanced Materials*. 2023; 35(14). DOI: 10.1002/adma.202211027
54. Dai Q., Qian J., Li S., Tao L. Green Energy Harvesting and Management Systems in Intelligent Buildings for Cost-Effective Operation. *Buildings*. 2024; 14(3):769. DOI: 10.3390/buildings14030769
55. Huang Y.S., Hsieh P.H. Interface Circuits for Piezoelectric Energy Harvesting: A review of designs and methods. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2021; 13(4):98-111. DOI: 10.1109/mssc.2021.3111388
56. Pandiyan P., Saravanan S., Usha K., Kannadasan R., Alsharif M.H., Kim M.K. Technological advancements toward smart energy management in smart cities. *Energy Reports*. 2023; 10:648-677. DOI: 10.1016/j.egy.2023.07.021
57. Cui K., Lau D., Chang J. Advancements in energy harvesting through building materials : a critical review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 98:111412. DOI: 10.1016/j.job.2024.111412
58. Chen Y., Hong J., Xiao Y., Zhang H., Wu J., Shi Q. Multimodal Intelligent Flooring System for Advanced Smart-Building Monitoring and Interactions. *Advanced Science*. 2024; 11(40). DOI: 10.1002/advs.202406190
59. Bal S., Rani N.R.A. Next generation building materials for energy efficiency and climate responsive design. *Discover Applied Sciences*. 2025; 7(8). DOI: 10.1007/s42452-025-07360-z
60. Birgin H.B., D'Alessandro A., Meoni A., Ubertini F. Self-Sensing Eco-Earth Composite with Carbon Microfibers for Sustainable Smart Buildings. *Journal of Composites Science*. 2023; 7(2):63. DOI: 10.3390/jcs7020063
61. Ergün M., Uyar M., Malgaca L. Performance analysis of piezoelectric-based energy harvesting in reinforced concrete buildings under seismic and live loads. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025; 47(10). DOI: 10.1007/s40430-025-05857-7
62. Thongthapthai W., Sintusiri J., Prada T., Thongbai P., Amornkitbamrung V., Chindaprasit P. et al. Lightweight cement-natural rubber nanocomposites for high-performance triboelectric nanogenerators in smart flooring applications. *Construction and Building Materials*. 2025; 501:144230. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144230
63. He P., Li X., Wang M., Lv D., Wang J., Zou L. et al. High humidity-resisted all-wood-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting and human motion monitoring. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 521:167158. DOI: 10.1016/j.cej.2025.167158
64. Stanford M.G., Li J.T., Chyan Y., Wang Z., Wang W., Tour J.M. Laser-Induced Graphene Triboelectric Nanogenerators. *ACS Nano*. 2019; 13(6):7166-7174. DOI: 10.1021/acsnano.9b02596
65. Chen H., Xu Y., Zhang J., Wu W., Song G. Enhanced stretchable graphene-based triboelectric nanogenerator via control of surface nanostructure. *Nano Energy*. 2019; 58:304-311. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.01.029
66. Matsunaga M., Hirotani J., Kishimoto S., Ohno Y. High-output, transparent, stretchable triboelectric nanogenerator based on carbon nanotube thin film toward wearable energy harvesters. *Nano Energy*. 2020; 67:104297. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104297

67. Liu C., Li J., Che L., Chen S., Wang Z., Zhou X. Toward large-scale fabrication of triboelectric nanogenerator (TENG) with silk-fibroin patches film via spray-coating process. *Nano Energy*. 2017; 41:359-366. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.09.038
68. Domingos I., Neves A.I.S., Craciun M.F., Alves H. Graphene Based Triboelectric Nanogenerators Using Water Based Solution Process. *Frontiers in Physics*. 2021; 9. DOI: 10.3389/fphy.2021.742563
69. Keel E., Ejaz A., Mckinlay M., Garcia M.P., Caffio M., Gibson D. et al. Three-dimensional graphene foam based triboelectric nanogenerators for energy systems and autonomous sensors. *Nano Energy*. 2023; 112:108475. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108475
70. Pan R., Xuan W., Chen J., Dong S., Jin H., Wang X. et al. Fully biodegradable triboelectric nanogenerators based on electrospun polylactic acid and nanostructured gelatin films. *Nano Energy*. 2018; 45:193-202. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.12.048
71. Gu L., German L., Li T., Li J., Shao Y., Long Y. et al. Energy Harvesting Floor from Commercial Cellulosic Materials for a Self-Powered Wireless Transmission Sensor System. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021; 13(4):5133-5141. DOI: 10.1021/acsami.0c20703
72. Mappoli S., Ghosh K., Pumera M. Multi-material 3D printed smart floor tiles with triboelectric energy generation and security monitoring. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025; 20(1). DOI: 10.1080/17452759.2025.2457580
73. Huang J., Li D., Wu G., Hu W., Tan S., Zhao Z. et al. Yarn-based smart cement composite for self-sensing and energy harvesting in civil infrastructure. *Composites Part B: Engineering*. 2026; 312:113270. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.113270
74. Yuan Y., Cai J., Xi X., Ukrainczyk N., Wang Y., Pei Z. et al. Advancing the Mechanical and Thermoelectric Properties of Geopolymers for Sustainable Architecture. *Small*. 2025; 21(32). DOI: 10.1002/smll.202408048
75. Prouskas C., Mourkas A., Zois G., Lidorikis E., Patsalas P. A New Type of Architecture of Dye-Sensitized Solar Cells as an Alternative Pathway to Outdoor Photovoltaics. *Energies*. 2022; 15(7):2486. DOI: 10.3390/en15072486
76. Fu M., Yuan Y., Liu X., Sun Z., Hu F., Luo C. et al. A Thermosensitive Ionic Hydrogel for Thermotropic Smart Windows With Integrated Thermoelectric Energy Harvesting Capability. *Advanced Functional Materials*. 2025; 35(1). DOI: 10.1002/adfm.202412081

Received January 9, 2025.

Adopted in revised form on January 19, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: Balasubramanian Kandasubramanian — Additive Manufacturing Laboratory, Department of Metallurgy and Materials Science; Defence Institute of Advanced Technology; Pune, Girinagar, Maharashtra, 411025, India; meetkbs@gmail.com.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 001.891

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.12

Деловая игра «Подготовка строительного производства» как дополнительный метод освоения дисциплины «Основы организации строительного производства» студентами строительного университета

Ангелина Владимировна Корнева¹, Марианна Борисовна Белугина²

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

² Международный открытый социально-гуманитарный университет (МОСГУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен разработанный авторами сценарий деловой игры «Подготовка строительного производства» как дополнительный педагогический метод обучения студентов строительных специальностей в рамках дисциплины «Основы организации строительного производства». Исследование базируется на анализе когнитивных характеристик поколения Z и необходимости адаптации образовательных технологий к их особенностям восприятия информации. Научная новизна работы заключается в разработке четырехтактной структуры игры с параллельным развитием событий по двум объектам, обеспечивающим высокую вовлеченность участников; моделировании взаимодействия семи типов участников строительства, формирующего целостное представление о системе управления строительным производством; обоснованной связи между игровой структурой и формированием индикаторов компетенций УК-2, УК-4, ОПК-9 через моделирование реальных управленческих ситуаций, требующих принятия решений в условиях ограниченных ресурсов и времени; а также разработке комплекта практико-ориентированных раздаточных материалов, интегрирующих теоретические знания в систему профессиональной деятельности.

Материалы и методы. Методология исследования включает сценарное планирование. Игра предусматривает распределение студентов по командам, каждая из которых выполняет роль определенного участника строительного процесса и решает профессиональные задачи: разработку задания на проектирование, проведение тендеров, заключение договоров и управление ресурсами.

Результаты. Апробация показала высокую эффективность метода: 92 % студентов активно включились в процесс, продемонстрировали результативность в освоении теоретического материала, развили коммуникативные компетенции и навыки совместного принятия решений в условиях временных ограничений.

Выводы. Разработанный сценарий деловой игры может быть эффективным в образовательном процессе для формирования профессиональных компетенций студентов строительных специальностей, повышения их мотивации к обучению и развития навыков командной работы, что подтверждается результатами апробации и высокой степенью вовлеченности участников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деловая игра, сценарий учебной игры, активное обучение, организация строительного производства, формирование компетенций, педагогические технологии

Благодарности. Авторы выражают благодарность Данилу Витальевичу Кудряшову за помощь в доработке сценария и участие в проведении деловой игры в качестве модератора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Корнева А.В., Белугина М.Б. Деловая игра «Подготовка строительного производства» как дополнительный метод освоения дисциплины «Основы организации строительного производства» студентами строительного университета // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 12. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.12

Автор, ответственный за переписку: Ангелина Владимировна Корнева, lina.zagorskaya@gmail.com.

Business game “Preparation of Construction Production” as a supplementary method for students at a construction university to master the subject “Fundamentals of the Organization of Construction Production”

Angelina V. Korneva¹, Marianna B. Belugina²

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

² International Open University of Social Sciences and Humanities; Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the scenario for the business game “Preparation of Construction Production”, developed by the authors as a supplementary teaching method for students of construction-related disciplines within the framework of the course “Fundamentals of the Organization of Construction Production”. The study is based on an analysis of the cognitive characteristics of generation Z and the need to adapt educational technologies to their information processing patterns. The scientific novelty of the work lies in the development of a four-stage game structure with events unfolding in parallel across two sites, ensuring high participant engagement; the modelling of interactions between seven types of construction stakeholders, fostering a holistic understanding of the construction production management system; a well-founded link between the game structure and the development of competence indicators UK-2, UK-4 and OPK-9 through the modelling of real-life management situations requiring decision-making under conditions of limited resources and time; and the development of a set of practice-oriented handouts that integrate theoretical knowledge into the system of professional practice.

Materials and methods. The research methodology includes scenario planning. The game provides for the distribution of students into teams, each of which performs the role of a specific participant in the construction process and solves professional tasks: developing design assignments, conducting tenders, concluding contracts and managing resources.

Results. The approbation demonstrated the high effectiveness of the method: 92 % of students actively engaged in the process, showed effectiveness in mastering theoretical material, and developed communication skills and collaborative decision-making abilities under time constraints.

Conclusions. The developed business game scenario can be effective in the educational process for developing the professional competencies of students on construction courses, increasing their motivation to study and developing teamwork skills, as confirmed by the test results and the high level of participant engagement.

KEYWORDS: business game, educational game scenario, active learning, organization of construction production, competence development, pedagogical technologies

Acknowledgements. The authors would like to thank Danil Vitalyevich Kudryashov for his assistance in finalising the script and for participating in the business game as a moderator.

FOR CITATION: Korneva A.V., Belugina M.B. Business game “Preparation of construction production” as a supplementary method for students at a construction university to master the subject “Fundamentals of the organization of construction production”. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):12. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.12

Corresponding author: Angelina V. Korneva, lina.zagorskaya@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно теории поколений, современные студенты, рожденные в 2000–2010 гг., относятся к поколению Z. По данным эмпирических исследований представители поколения Z имеют ряд сильных сторон, отличных от предыдущих поколений, в том числе: цифровую грамотность и быструю адаптацию к новым технологиям, самостоятельное и гибкое обучение, ориентацию на конкретный результат, способность к многозадачности и умение быстро переключаться между действиями. Особенности поколения, связанные с когнитивно-стилевой и эмоционально-ценностной сферами личности [1], включая стиль мышления, скорость восприятия и обработки информации, время концентрации внимания на различных видах деятельности, важны с точки зрения организации образовательного процесса студентов.

Предрасположенность поколения Z к самостоятельному и гибкому обучению выражается в предпочтении к кратким форматам: короткие видео, онлайн-курсы, а также в быстром переключении между источниками знаний и критической оценке информации. Также отмечается [2], что представители поколения Z погружены в цифровую среду в процессе обучения в вузе, что снижает концентрацию внимания в познавательном процессе. С учетом особенностей восприятия информации необходима адаптация процесса обучения и применение образовательных технологий, ориентированных на сильные стороны современного поколения. Одним из методов повышения вовлеченности, мотивации и эффективности студентов поколения Z является «геймификация» обучения и внедрение в образовательный процесс учебных деловых игр в дополнение к классическим лекционным и практическим занятиям.

Деловые игры, как метод активного обучения, стимулируют познавательную деятельность студентов, позволяют получить опыт решения профессиональных задач за счет моделирования фрагмента профессиональной деятельности и условий, приближенным к реальным [3]. Исследователями было установлено, что при подаче информации в виде деловой игры усваивается более 90 % материала [4]. В деловой игре реализуется решение познавательных и коммуникативных задач как в интересах студентов (познание себя, своих возможностей, лидерских качеств, умения работать в команде), так и в интересах преподавателя (интерес в обучающем процессе, понимание студентов поколения Z через поведение во время игры, принятие их особенностей и отличий от других поколений, возможность использовать эти особенности для успешного образовательного процесса, возможность отметить студентов, наиболее мотивированных и готовых включаться в трудовую деятельность уже на этапе обучения).

Нахождение преподавателя в одном игровом пространстве со студентами добавляет значимости и авторитета преподавателю, усиливает расположение и доверие, раскрывает личность педагога, сближает преподавателей и студентов в профессиональном и учебном поле, что способствует продуктивности обучающего процесса.

Применительно к дисциплине «Основы организации строительного производства» (далее — дисциплина), целью которой является формирование компетенций обучающегося в области организации строительного производства, необходимо отметить, что в соответствии с рабочей программой по результатам освоения дисциплины у студентов должны быть сформированы компетенции, для развития которых целесообразны именно активные методы обучения, способные вызвать интерес к профессии и практической деятельности. В том числе следующие компетенции:

- УК-2 «Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений»;
- УК-4 «Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации»;
- ОПК-9 «Способен организовывать работу и управлять коллективом производственного подразделения организаций».

Организация строительного производства — многофакторная управленческая задача, предполагающая и широкий спектр теоретических знаний, и учет требований законодательства, отраслевых регламентов, строительных норм и правил, и практических навыков взаимодействия, и понимания общей логики подготовительного и производственного процесса, а именно с помощью деловых игр успешно воспроизводятся и изучаются сложные

вопросы управления в тех случаях, когда в единой системе должны быть увязаны различные интересы и ресурсы. Кроме того, по одному из имеющихся определений деловая игра представляет собой «педагогический прием моделирования различных управленческих и производственных ситуаций, имеющих целью обучение отдельных личностей и групп принятию решений» [5]. Некоторые примеры деловых игр, применяемых в образовательном процессе, представлены в работах [6, 7]. Вопросы развития универсальных компетенций, особенностей поколения Z, а также использования геймификации и современных образовательных подходов в вузах подробно рассматриваются в ряде исследований [8–20].

Представленный в настоящей статье сценарий деловой игры основан на теоретических аспектах дисциплины, подробно изложенных в учебных пособиях^{1,2}, изучаемых в разделах «Характеристика строительной отрасли», «Управление строительным производством», «Саморегулирование в строительстве», «Подготовка строительного производства» лекционного материала по дисциплине.

Педагогическими целями деловой игры является интеграция освоенных теоретических знаний в целостную систему, представленную в виде фрагмента профессиональной деятельности, а именно: знаний об участниках строительства (застройщик, технический заказчик, проектно-изыскательские организации) и их взаимодействии (проведение тендеров, заключение договоров), процессе организации работ по объекту (утверждение задания на проектирование, выбор исполнителя проектно-изыскательских работ), структуры управления организации (линейная, функциональная, комбинированная организационная структуры); работа с шаблонами документов, приближенных к применяемым на практике (задания на проектирование, коммерческое предложение, договор, акт сдачи-приемки выполненных работ), а также формирование навыков проведения деловых переговоров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При разработке сценария деловой игры использовались следующие материалы: теоретические источники (учебники и монографии по дисциплине «Основы организации строительного производства», деловым играм, педагогическим технологиям и игровому обучению, рабочая программа НИУ МГСУ, шифр Б1.О.26 по дисциплине); эмпирические данные (кейсы реальных компаний, выполняющих функции застройщика и технического заказчика по объектам различного функционального назначения, финансируемых как с привлечением бюджетного финансиро-

¹ Олейник П.П. Основы организации и управления в строительстве : учебник. М. : АСВ, 2014. 200 с.

² Олейник П.П. Организация, планирование и управление в строительстве : учебник. М. : АСВ, 2015. 160 с.

вания, так и за счет частных средств, проектно-изыскательских организаций). Раздаточные материалы формировались с учетом требований действующего законодательства и нормативно-технических документов.

При разработке сценария применялся контент-анализ (изучение существующих кейсов и методических пособий) и метод сценарного планирования для выработки ключевых игровых ситуаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание сценария учебной деловой игры «Подготовка строительного производства»

Учебная деловая игра (далее — игра) рассчитана на 30–50 студентов. При этом для качественного вовлечения в игру всех участников в помощь основному преподавателю (ведущему игры) необходимо привлечение дополнительного модератора.

Игра в упрощенном виде, но приближенном к реальной практике, моделирует процессы:

- разработка и утверждение задания на проектирование объекта (ЗнП);
- выбор исполнителей проектно-изыскательских работ;

- заключение договоров между юридическими лицами;
- подготовка и утверждение проектно-изыскательской документации (ПИР);
- подготовка к тендеру на проведение строительно-монтажных работ (СМР).

До проведения деловой игры студенты должны быть ознакомлены с теоретическим материалом дисциплины по темам: основные термины и определения в области организации строительства; жизненный цикл (ЖЦ) объекта капитального строительства (ОКС); участники строительства; взаимодействие участников строительства; организационно-правовые формы хозяйственных организаций; структура управления организациями; саморегулирование в строительстве.

Рассматриваемые в рамках игры этапы приведены на рис. 1.

Аудитория делится на команды, каждая из которых становится отдельной организацией — участником строительства. Состав участников представлен на рис. 2.

Для демонстрации различий в организации процесса в игре присутствует два застройщика (здесь и далее понятия используются в соответствии с Гра-



Рис. 1. Этапы, рассматриваемые в игре



Рис. 2. Состав команд — участников игры

достоительным кодексом РФ³), один из которых является подведомственным учреждением и планирует строительство за счет бюджетного финансирования (ФГБУ «Капитальное строительство»), а другой — частной организацией (ООО «Московский девелопер»). Каждый застройщик реализует мероприятия по одному ОКС. С учетом нижеизложенной штатной расстановки и компетенций сотрудников ООО «Московский девелопер» предполагается, что этот застройщик будет передавать свои функции техническому заказчику. На «рынке» деловой игры присутствуют три равнозначные проектно-изыскательские организации для демонстрации конкурент-

ной среды. Каждая из проектно-изыскательских организаций может участвовать в проектно-изыскательских работах по каждому из двух объектов. Команда «площадка госзакупки» имитирует работу единой информационной системы в сфере закупок и участвует в проведении тендера застройщика ФГБУ «Капитальное строительство». В табл. 1 представлены общие вводные, цели и задачи в игре для каждой команды-участника.

В табл. 2 в упрощенном виде представлены штатная расстановка и организационная структура управления каждой организацией (функциональная система управления, все отделы подчиняются генеральному директору), приведены рекомендуемые задачи. Каждому студенту-участнику команды необходимо назначить должность в организации или определить, в каком отделе он работает.

³ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 31.07.2025). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

Табл. 1. Общие вводные, цели и задачи в игре для каждой команды-участника

Номер	Общие вводные	Цель в игре	Задачи в игре	Рекомендуемое количество студентов в команде
1	2	3	4	5
Команда 1. Застройщик ФГБУ «Капитальное строительство»				
1	Является застройщиком ОКС «Производственный корпус». На объект выделено 100 000 денежных единиц из средств федерального бюджета. Других денежных средств у застройщика нет. В производственном корпусе нужно разместить оборудование, которое занимает 50 м² (без учета площадей, необходимых помещений административно-бытового назначения). В штате есть собственные квалифицированные специалисты	Оптимально распорядиться имеющимся бюджетом. Подготовить проектно-сметную документацию, которая позволит построить объект, соответствующий поставленной задаче	Разработать и утвердить задание на проектирование. Провести тендер (№ 44-ФЗ) и заключить договор с проектно-изыскательской организацией. Принять результат работ (проектно-изыскательскую документацию). Объявить тендер на строительство	7–10 чел.
Команда 2. ООО «Московский девелопер»				
2	Является застройщиком ОКС «Многоэтажный жилой дом». Получил кредит в банке в размере 180 000 денежных единиц. Других денежных средств у застройщика нет. В штате нет инженерно-технических сотрудников	Построить как можно больше кв. м жилья. Подготовить проектно-сметную документацию, которая позволит построить объект, соответствующий поставленной задаче	Организовать разработку проектно-сметной документации, заключить договор с техническим заказчиком. Утвердить задание на проектирование. Утвердить проектно-изыскательскую документацию	3–5 чел.

Окончание табл. 1

Номер	Общие вводные	Цель в игре	Задачи в игре	Рекомендуемое количество студентов в команде
1	2	3	4	5
Команда 3. Технический заказчик (название выбирают студенты)				
3	Является техническим заказчиком, в штате есть собственные квалифицированные специалисты	Заработать	Заклучить договор с застройщиком. Разработать задание на проектирование. Провести тендер и заключить договор с проектно-изыскательской организацией. Принять результат работ (проектно-изыскательскую документацию) и сдать его застройщику	3–5 чел.
Команды 4, 5, 6. Проектно-изыскательские организации (названия выбирают студенты)				
4	Квалифицированные проектно-изыскательские организации, обладающие опытом работы	Заработать	Подготовиться к участию в тендерах. Заключить договор на разработку проектно-изыскательской документации. Разработать проектно-изыскательскую документацию. Сдать результат работ	5–9 чел. в каждой команде
Команда 7. Площадка «Госзакупки»				
5	Команда будет дополнительно проинструктирована по регламенту работы, на что обращать внимание при проверке документов и по методике определения победителя (приведены в раздаточном материале)	Обеспечить проведение тендера	Проверять поступающую документацию. Информировать о проводимом тендере. Получить коммерческие предложения. Определить победителя. Сопроводить заключение договора	2–3 чел.

Табл. 2. Штатная расстановка и организационная структура управления для каждой команды-участника

Номер	Должность	Рекомендуемые задачи
1	2	3
Команда 1. Застройщик ФГБУ «Капитальное строительство»		
1.1	Генеральный директор	Организовать работу. Убедиться в качестве результатов. Представить результат
1.2	Главный инженер, штат инженеров	Подготовить технические требования в задании на проектирование
1.3	Экономический отдел	Распределить бюджет (в том числе определить и согласовать с главным инженером площадь проектируемого объекта). Определить начальную максимальную стоимость контрактов на ПИР и СМР
1.4	Отдел по взаимодействию с контрагентами	Подготовить требования к участникам тендера. Подготовить договор к заключению. Организовать подписание актов сдачи-приемки выполненных работ

Окончание табл. 2

Номер	Должность	Рекомендуемые задачи
1	2	3
Команда 2. ООО «Московский девелопер»		
2.1	Генеральный директор	Организовать работу. Провести переговоры с техническим заказчиком и согласовать условия работы. Убедиться в качестве результатов. Представить результат
2.2	Экономический отдел	Распределить бюджет (в том числе определить и согласовать с генеральным директором площадь проектируемого объекта). Определить начальную максимальную стоимость контрактов на ПИР и СМР. Подготовить договор к заключению. Организовать подписание актов сдачи-приемки выполненных работ
Команда 3. Технический заказчик (название выбирают студенты)		
3.1	Генеральный директор	Организовать работу. Убедиться в качестве результатов. Представить результат
3.2	Главный инженер, штат инженеров	Подготовить технические требования в задании на проектирование
3.3	Экономический отдел	При необходимости перераспределить бюджет, определить начальную максимальную стоимость контрактов на ПИР и СМР
3.4	Отдел по взаимодействию с контрагентами	Продумать порядок выбора исполнителя ПИР. Подготовить договор к заключению. Организовать подписание актов сдачи-приемки выполненных работ
Команды 4, 5, 6. Проектно-изыскательские организации (названия выбирают студенты)		
4.1	Генеральный директор	Организовать работу. Убедиться в качестве результатов. Представить результат
4.2	Главный инженер, штат инженеров	Разработать проектно-изыскательскую документацию
4.3	Отдел по взаимодействию с контрагентами	Подготовиться к участию в тендере/выбору исполнителя ПИР. Подготовить договор к заключению

Средняя стоимость проектно-изыскательских работ

✓ 5 денежных единиц за кв. м

Средняя стоимость строительно-монтажных работ

✓ 1000 денежных единиц за кв. м

Критерии выбора исполнителя

✓ Наименьшая стоимость.

✓ Соответствие квалификационным требованиям.

✓ Опыт аналогичных работ

Рис. 3. Общие вводные для участников игры

Общие вводные, необходимые для всех участников игрового процесса, представлены на рис. 3.

Игровой процесс разделен на 4 такта по 10 минут каждый. В течение каждого такта команды выполняют игровые задачи в последовательности, показанной

на рис. 4. Время каждого такта и состав его мероприятий может быть скорректирован ведущим игры с учетом скорости выполнения командами игровых задач. Ведущему необходимо направлять действия каждой команды, обеспечивая синхронное продвижение к це-

	1-й такт (10 мин)	2-й такт (10 мин)	3-й такт (10 мин)	4-й такт (10 мин)
ФГБУ «Капитальное строительство»	Разрабатывает и утверждает ЗнП. Объявляет тендер на ПИР	Проводят тендер на площадке «Госзакупки» и определяют победителя	Контролирует	Утверждает проектно-изыскательскую документацию
Проектно-изыскательские организации	Готовятся к участию в тендере.	Участвуют в тендере	Организация-победитель тендера разрабатывает проектно-изыскательскую документацию, сдает заказчику. Другие организации участвуют в тендере	1 организация разрабатывает проектно-изыскательскую документацию. Сдает результат застройщику
ООО «Московский девелопер»	Согласовывают условия и заключают между собой договор	Утверждает ЗнП. Контролирует	Контролирует	Контролирует. Утверждает проектно-изыскательскую документацию
Технический заказчик		Разрабатывает ЗнП. Продумывает порядок выбора исполнителя ПИР	Выбирает исполнителя ПИР. Заключает договор на разработку	Контролирует, согласовывает. Сдает результат застройщику

Рис. 4. Ход игры (базовый план)

лям. Допускается опускать незначительные детали (ошибки можно разобрать по завершении игрового процесса). Наиболее важными в игровом процессе являются вовлеченность участников, формирование представления о профессиональной деятельности участников строительства, реализуемой в условиях

сжатых сроков, и предусматривающем параллельное развитие событий по объектам.

По завершении каждого такта преподаватель озвучивает основные события такта и их результаты, направляет действия команд. По окончании игрового процесса ведущий преподаватель подводит итоги

Табл. 3. Критерии оценки результатов, достигнутых командами

Номер	Критерии достижения игровых целей	Критерии выполнения игровых задач
1	2	3

Команда 1. Застройщик ФГБУ «Капитальное строительство»

1	Разработана проектно-изыскательская документация по объекту «Производственный корпус» площадью >50 м². Предусмотренных денежных средств за вычетом фактических затрат на проектирование достаточно для последующего выполнения СМР по объекту	Застройщиком разработано и утверждено задание на проектирование, корректно определены технико-экономические показатели объекта (исходя из средней стоимости 1 м² ПИР и СМР, бюджета застройщика хватает на здание площадью на 99,5 м², данное значение не является единственно верным, так как командой могут быть выбраны различные стратегии: учитывать возможное тендерное снижение/оставлять резервы средств на непредвиденные расходы и т.д.). Задание на проектирование подписано должностными лицами, ответственными за его подготовку, и утверждено подписью главного инженера организации. Проведен тендер в соответствии с регламентом площадки «Госзакупки», заключен договор с проектно-изыскательской организацией. В договоре отражены основные условия сделки (стоимость, сроки, требования к результату). Договор подписан генеральным директором с каждой стороны. Проектная документация, переданная застройщику, соответствует требованиям задания на проектирование, титульные листы проектной документации подписаны должностными лицами, ответственными за ее подготовку, и утверждены подписью главного инженера проектно-изыскательской организации. В соответствии с регламентом площадки «Госзакупки» объявлен тендер на производство строительно-монтажных работ по объекту. В качестве исходных данных представлена разработанная проектно-изыскательская документация, определена начальная максимальная стоимость договора на СМР
---	--	--

Продолжение табл. 3

Номер	Критерии достижения игровых целей	Критерии выполнения игровых задач
1	2	3
<i>Команда 2. ООО «Московский девелопер»</i>		
2	Разработана проектно-изыскательская документация по объекту «Многоэтажный жилой дом». Предусмотренных денежных средств за вычетом фактических затрат на проектирование достаточно для последующего выполнения СМР по объекту	Заключен договор с техническим заказчиком. В договоре отражены основные условия сделки (стоимость, сроки, требования к результату). Договор подписан генеральным директором с каждой стороны. Условия сделки согласованы на уровне генеральных директоров организаций. Основным предметом обсуждения является стоимость услуг технического заказчика. Исходя из средней стоимости 1 м² ПИР и СМР, бюджета застройщика хватает на здание площадью на 179 м², чем большей площади смогла достичь команда, тем эффективнее были ее действия. Задание на проектирование подписано должностными лицами, техническим заказчиком, ответственным за его подготовку, в том числе главным инженером, утверждено генеральным директором застройщика и соответствует условиям договора между застройщиком и техническим заказчиком. Проектная документация, переданная застройщику, соответствует требованиям задания на проектирование, титульные листы проектной документации подписаны должностными лицами, ответственными за ее подготовку, утверждены подписью главного инженера проектно-изыскательской организации и согласованы техническим заказчиком
<i>Команда 3. Технический заказчик (название выбирают студенты)</i>		
3	Стоимость выполненных работ, в соответствии с актом сдачи-приемки выполненных работ, подписанным между застройщиком и техническим заказчиком (доход), больше, чем стоимость выполненных работ, в соответствии с актом сдачи-приемки выполненных работ, подписанным между техническим заказчиком и проектно-изыскательской организацией (расход)	Заключен договор с застройщиком. В договоре отражены основные условия сделки (стоимость, сроки, требования к результату). Договор подписан личной подписью генерального директора с каждой стороны. Условия сделки согласованы на уровне генеральных директоров организаций. Застройщиком подписан акт сдачи-приемки выполненных работ технического заказчика. Акт сдачи-приемки работ подписан личной подписью генерального директора с каждой стороны (исходя из условий игры предполагается, что застройщик не подпишет акт раньше, чем техническим заказчиком будут выполнены все предусмотренные обязательства). Основным предметом обсуждения является условная прибыль (разница между доходами и расходами) технического заказчика. Команда может выбрать разные стратегии, включая, но не ограничиваясь: подбор оптимальной площади объекта и проведение переговоров с заказчиком; проведение переговоров с проектно-изыскательскими организациями об уменьшении стоимости их работ. Чем большей прибыли смогла достичь команда, тем эффективнее были ее действия
<i>Команды 4, 5, 6. Проектно-изыскательские организации (названия выбирают студенты)</i>		
4	Между проектно-изыскательской организацией и заказчиком (застройщиком, техническим заказчиком, другой проектно-изыскательской организацией) подписан акт сдачи приемки выполненных работ, при этом стоимость выполненных работ больше 0. Если заключались субподрядные договоры для оценки условной прибыли стоимость принятых по ним работ нужно вычесть	Заключен хотя бы один договор на разработку проектно-изыскательской документации. Заказчиком подписан акт сдачи-приемки выполненных работ технического заказчика. Акт сдачи-приемки работ подписан личной подписью генерального директора с каждой стороны (исходя из условий игры предполагается, что заказчик не подпишет акт раньше, чем проектно-изыскательской организацией будут выполнены все предусмотренные обязательства).

Номер	Критерии достижения игровых целей	Критерии выполнения игровых задач
1	2	3
Команды 4, 5, 6. Проектно-изыскательские организации (названия выбирают студенты)		
4	Между проектно-изыскательской организацией и заказчиком (застройщиком, техническим заказчиком, другой проектно-изыскательской организацией) подписан акт сдачи приемки выполненных работ, при этом стоимость выполненных работ больше 0. Если заключались субподрядные договоры для оценки условной прибыли стоимость принятых по ним работ нужно вычесть	Основной задачей проектно-изыскательской организации является выбор оптимального плана действий, так как по каждому объекту предъявляются разные требования к участнику, по-разному организован процесс выбора исполнителя. Проектно-изыскательская организация может запланировать целенаправленное участие в отборе по одному из объектов, готовиться к участию в отборах по обоим объектам, проводить переговоры с другими участниками строительства, в том числе объединять усилия с другими проектно-изыскательскими организациями путем совместного участия в тендере или привлечения к работам в роли субподрядчика. Чем большей прибыли смогла достичь команда, тем эффективнее были ее действия
Команда 7. Площадка «Госзакупки»		
5	Проведен тендер на проектно-изыскательские работы по объекту «Производственный корпус», определен победитель. Принят комплект документов для проведения тендера на строительно-монтажные работы по объекту	В отличие от остальных команд, площадка «Госзакупки» не предполагает проактивной игровой позиции. Критерием эффективности действий команды является выполнение поставленных задач в соответствии с регламентом игры. Наиболее важными являются объективность, тщательная проверка поступающих документов предъявляемым требованиям, отклонение документов «по формальному признаку» (при необходимости) и точность при выполнении расчетов

и анализирует ход событий по каждому из двух объектов. Критериями успешного завершения игрового процесса являются выполнение командами поставленных игровых задач и достижение игровых целей, детализация критериев приведена в табл. 3.

Описание раздаточного материалы для проведения игры

Для игры рекомендован следующий раздаточный материал:

- 1. Типовая форма задания на проектирование ОКС, утвержденная приказом Минстроя России⁴. Возможна подготовка «игровой версии» в сокращенном виде с рекомендациями по заполнению (2–4 экземпляра).
- 2. Шаблон договора на выполнение работ (оказание услуг). В шаблон договора необходимо включить основные положения, предусмотренные Гражданским кодексом⁵ Российской Федерации: преамбула, предмет

договора, сроки выполнения работ, стоимость работ и порядок расчетов, права и обязанности сторон, порядок сдачи-приемки работ, реквизиты и подписи сторон (6–8 экземпляров).

- 3. Шаблон коммерческого предложения в свободной форме, содержащий сведения о наименовании претендента, предмете закупки, предлагаемой стоимости и сроках выполнения работ, сведения о квалификации претендента, сведения об опыте выполнения аналогичных работ, прочие сведения (8–10 экземпляров).
- 4. Шаблон акта сдачи-приемки работ по договору по форме, рекомендуемой приказом⁶ Минстроя России Приложения № 4. Акт сдачи-приемки выполненных работ (6–8 экземпляров).
- 5. Шаблон титульного листа проектно-изыскательской документации по форме Приложения Р государственного стандарта⁷ (10–12 экземпляров).
- 6. Общие игровые вводные (7 экземпляров).

⁴ Об утверждении типовой формы задания на проектирование объекта капитального строительства и требований к его подготовке : приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.03.2018 № 125/пр с изм. на 02.03.2022 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2018. № 13. Ст. 1702.
⁵ Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть 1 : Федеральный закон от 26.01.1996 № 14-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1996. № 5. Ст. 410.

⁶ Об утверждении Типового государственного (муниципального) контракта на строительство (реконструкцию) объекта капитального строительства и информационной карты указанного типового контракта : приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 05.07.2018 № 398/пр (в ред. от 20.06.2019) (зарег. в Минюсте России 10.10.2018 № 52383).
⁷ ГОСТ Р 21.101–2020. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. М. : Стандартинформ, 2020. 28 с.

Пример расчета

Критерий	Предложение 1			Предложение 2			Предложение 3		
Стоимость	100 руб.	2	= 2 · 0,6 = 1,2	80 руб.	3	= 3 · 0,6 = 1,8	120 руб.	1	= 1 · 0,6 = 0,6
Срок	5 мин	2	= 2 · 0,1 = 0,2	10 мин	1	= 1 · 0,1 = 0,1	3 мин	3	= 3 · 0,1 = 0,3
Опыт	5 объектов	3	= 3 · 0,3 = 0,9	1 объект	1	= 1 · 0,3 = 0,3	3 объекта	2	= 2 · 0,3 = 0,6
Сумма баллов		Σ	2,3		Σ	2,2		Σ	1,5

Победитель — Предложение 1

Шаблон для расчета

Критерий	Предложение 1			Предложение 2			Предложение 3		
Стоимость									
Срок									
Опыт									
Сумма баллов		Σ			Σ			Σ	

Рис. 5. Пример фрагмента раздаточного материалы для команды «Площадка госзакупки»

7. Регламент работы площадки госзакупки в свободной форме с указанием: обязательных требований к проектной организации (наличие СРО на изыскания и проектирование), требований к комплекту передаваемой документации (в том числе наличие сведений о застройщике, предмете закупки, предполагаемой (предельной) стоимости) ПИР/СМР, критериев определения победителей (рекомендуемые значения: 60 % — стоимость, 10 % — срок, 30 % — опыт). Пример расчета и шаблон для расчета, рекомендованные к включению в раздаточный материал, приведены на рис. 5.

В зависимости от предполагаемого времени для проведения игры возможна разная степень проработки раздаточного материала. Для соблюдения тайминга, предложенного в сценарии, предполагается, что раздаточный материал заранее заполнен всеми данными, за исключением тех, которые определяют- ся в ходе игрового процесса.

Следует отметить, что живое общение, минуя цифровое, и бумажный вариант документов в виде раздаточного материала даются поколению Z сложнее и вместе с тем приучают к дальнейшей трудовой деятельности, где будут присутствовать различные варианты рабочих, коллегиальных коммуникаций.

Описание хода деловой игры

1. Преподаватель (ведущий игры) объявляет о проведении учебной деловой игры «Подготовка к строительству». Преподаватель дает следующие установки на игру:

- в ходе игры необходимо использовать ранее полученные теоретические знания;
- рекомендуется подключать фантазию и самостоятельно придумывать все недостающие вводные, так как основной целью игры является знакомство с процессом организации строительства;
- игра учебная, т.е. допустимы ошибки, задавать вопросы, использовать любые материалы и источники. Главным критерием служит активность студента и во-

влеченность в игровой процесс (возможность делать ошибки понятна для поколения геймеров, а в контексте игры дает возможность для творчества, моделирования различных вариантов хода событий, тем самым еще больше включая в постижение предмета);

- на время игры студентам предлагается войти в роли и не забыть из них выйти после завершения игры.

2. Преподаватель знакомит аудиторию с предложенными в игре ролями, одновременно с этим разделяя участников на 7 команд.

3. Преподаватель знакомит аудиторию с вводными о каждом участнике, целями и задачами в игре. При этом предполагается демонстрация сведений, представленных в табл. 1. Возможный пример оформления слайда для демонстрации вводных приведен на рис. 6.

4. После знакомства с целями и задачами каждой команды осуществляется распределение ролей (должностей) внутри организации. При этом предполагается демонстрация сведений, представленных в табл. 2. Возможный пример оформления слайда для демонстрации вводных приведен на рис. 7.

5. Преподаватель демонстрирует общие вводные, представленные на рис. 3, и разъясняет ход игры, приведенный на рис. 4. Отвечает на вопросы студентов.

6. Преподаватель приглашает студентов, находящихся в роли генеральных директоров организаций, для ознакомления с имеющимся в наличии раздаточным материалом. Отвечает на вопросы, дает установки на первый такт игры.

7. Преподаватель дает сигнал о начале первого такта игры, засекает время. В течение первого такта необходимо дополнительно проинструктировать команду «Площадка госзакупки», с привлечением модератора направить действия команд, находящихся в роли застройщиков, и координировать действия других команд. По завершении такта преподаватель кра-

ФГБУ «Капитальное строительство»

Цель в игре

✓

Оптимально распорядиться имеющимся бюджетом.

✓

Подготовить проектно-сметную документацию, которая позволит построить объект, соответствующий поставленной задаче

Задачи в игре

✓

Разработать и утвердить задание на проектирование.

✓

Провести тендер (№ 44-ФЗ) и заключить договор с проектно-изыскательской организацией.

✓

Принять результат работ (проектно-изыскательскую документацию).

✓

Объявить тендер на строительство

Рис. 6. Пример демонстрации вводных, указанных в табл. 1

ФГБУ «Капитальное строительство»

Организационная структура

Должность	Рекомендуемые задачи
Генеральный директор	Организовать работу. Убедиться в качестве результата. Презентовать результат
Главный инженер, штат инженеров	Подготовить технические требования в задании на проектирование
Экономический отдел	Распределить бюджет, определить начальную максимальную стоимость контрактов на ПИР и СМР
Отдел по взаимодействию с контрагентами	Подготовить требования к участникам тендера. Подготовить договор к заключению

Рис. 7. Пример демонстрации вводных, указанных в табл. 2

тко оглашает достигнутые результаты, дает установку на второй такт.

8. Преподаватель дает сигнал о начале второго такта игры, засекает время. В начале второго такта преподавателем или «Площадкой госзакупки» делается устное объявление о проведении тендера, сообщаются основные условия, оглашается время подачи заявки (в минутах). В течение такта с привлечением модератора необходимо направить действия команд, находящихся в роли проектно-изыскательских организаций и технического заказчика, координировать действия других команд. По завершении такта преподаватель кратко оглашает достигнутые результаты, дает установку на третий такт.

9. Преподаватель дает сигнал о начале третьего такта игры, засекает время. В течение такта с привлечением модератора необходимо направить действия команд, находящихся в роли проектно-изыскательских организаций и застройщика «ФГУП Капитальное строительство», координировать действия других команд. По завершении такта преподаватель

кратко оглашает достигнутые результаты, дает установку на четвертый такт.

10. Преподаватель дает сигнал о начале четвертого такта игры, засекает время. В течение такта с привлечением модератора необходимо направлять и координировать действия всех команд, направленных на достижение игровых целей или промежуточных результатов. По завершении такта преподаватель приглашает студентов, находящихся в роли генеральных директоров всех организаций, для совместного оглашения достигнутых каждой организацией результатов и анализа хода событий по каждому из рассматриваемых в игре объектов. Преподаватель делает акценты на наиболее удачных игровых моментах.

11. В завершении игры проводится общая рефлексия. Примеры вопросов, которые могут быть заданы преподавателем для рефлексии:

- какие решения команды были эффективны;
- какие решения команды не сработали;
- чему научились в ходе проведения игры;
- какие аспекты остались не понятными.

12. Преподаватель благодарит студентов за участие в игре.

Апробация и внедрение

Деловая игра в соответствии с предложенным сценарием проведена в октябре 2025 г. в дополнение к лекционному материалу по дисциплине «Основы организации строительного производства» для студентов Института экономики, управления и коммуникаций в сфере строительства и недвижимости 3-го курса обучения. В игре приняли участие 46 студентов, из которых:

- 42 студента активно вовлеклись в игровой процесс и принимали участие в групповой работе (92 % от общего количества);
- 2 студента испытывали сложности в связи с наличием языкового барьера, являлись наблюдателями игрового процесса и были ознакомлены с шаблонами документов, использованных в игре в индивидуальном порядке (4 % от общего количества);
- 2 студента не вовлеклись в командную работу по личной инициативе, являлись наблюдателями игрового процесса, были в индивидуальном порядке ознакомлены с шаблонами документов, использованных в игре, и задали ряд уточняющих вопросов преподавателю по теме дисциплины (4 % от общего количества).

Деловая игра проведена одним преподавателем, с привлечением одного модератора, что позволило охватить вниманием и направлять действия всех команд. Общий тайминг составил 70 мин, включая 10 мин — разъяснение правил игры, 50 мин — основной игровой процесс, 10 мин — подведение итогов.

Распределение на команды осуществлялось по принципу объединения в команду рядом сидящих студентов. При распределении игровых должностей внутри команды, в первую очередь, назначался генеральный директор. При этом в пяти из шести команд студенты самостоятельно определили генерального директора. В одной из команд генеральный директор был назначен преподавателем. В ходе проведения игры во всех шести командах работа велась с учетом рекомендуемого распределения обязанностей участников. В одной из команд групповая работа сложилась наиболее эффективным образом — участники работали каждый над своим блоком параллельно друг другу, генеральный директор взаимоувязывал результаты и взаимодействовал с «внешними контрагентами». В одной из команд генеральный директор столкнулся со сложностями делегирования и самостоятельно работал или дорабатывал результат по каждому блоку вопросов. Каждая команда получила опыт взаимодействия в рамках структуры управления организацией.

В ходе деловой игры команде, играющей роль застройщика «ФГБУ «Капитальное строительство», при участии команд, играющих роли «Площадка госзакупки» и «Проектно-исследовательской организации № 3», удалось реализовать предусмотренный игровой процесс от этапа утверждения задания на проектирование до этапа утверждения проектно-исыска-

тельской организации с подписанием необходимых договоров и актов сдачи-приемки выполненных работ. При проведении тендера победителям была объявлена единственная организация, корректно подавшая заявку на участие (вторая организация-претендент не уложились в регламентные сроки проведения тендера, третья заявка была отклонена по формальному признаку — некорректно указан предмет закупки). В качестве комплекта документов, имитирующих проектную документацию, командой «Проектно-исыскательской организации № 3» были подготовлены титульные листы проектной документации с подписями ответственных лиц и импровизированные чертежи по разделам «СПОЗУ» и «КР» (из личных материалов студентов).

Команде, играющей роль застройщика ООО «Московский девелопер», при участии команд «Технический заказчик», «Проектно-исыскальская организация № 1», «Проектно-исыскальская организация № 2» в ходе игры удалось утвердить задание на проектирование и заключить договоры между участниками процесса: «застройщик» — «технический заказчик», «технический заказчик» — «Проектно-исыскальская организация № 2», «Проектно-исыскальская организация № 2» — «Проектно-исыскальская организация № 1». Студентами было принято самостоятельное решение о привлечении Проектно-исыскательской организации № 1 в качестве субподрядчика для разработки отдельных разделов проектной документации. Процесс разработки проектной документации не был завершен в связи со значительными временными затратами на переговоры участников. При этом между всеми командами были согласованы коммерческие условия заключения договоров и требования к результатам работ, включая технико-экономические показатели объектов. В ходе деловых переговоров студентами получено представление о процессах планирования и управления в условиях, когда в единой системе должны быть увязаны различные интересы и ресурсы.

Общие результаты проведения игры оценены преподавателем как успешный опыт закрепления полученных теоретических знаний по отдельным разделам дисциплины «Основы организации строительного производства», опыт взаимодействия будущих специалистов формирования коммуникативных компетенций и совместного принятия решений в условиях сжатых сроков, формирования творческого профессионального мышления. Проведенная игра оказала положительное влияние на успеваемость студентов по изучаемому предмету.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Деловая игра «Подготовка строительного производства» представляет собой дополнительный образовательный педагогический метод для обучения студентов строительных специальностей. Игра разработана с учетом особенностей поколения Z и направлена на формирование профессиональных

компетенций в области организации строительного производства. Приближение к пониманию будущей профессиональной деятельности, в свою очередь, способствует осмыслению студентами своей роли, желаний и возможностей в приближающейся профессиональной деятельности, в будущем трудовом процессе.

Методология игры базируется на активных методах обучения и предполагает моделирование реальных производственных процессов. Студенты распределяются по командам, каждая из которых играет роль определенного участника строительства: застройщика, технического заказчика, проектно-изыскательской организации. Работа в малых группах способствует вовлечению каждого члена группы в процесс и возможность дальнейшего анализа как для преподавателя, так и лично для каждого студента.

Основная ценность методики заключается в интеграции теоретических знаний с практическими

навыками управления в строительной отрасли через игровое моделирование профессиональной деятельности, имеющее положительный эффект как для студентов, так и для преподавателя.

Игровой процесс включает четыре такта, в течение которых участники выполняют профессиональные задачи: разрабатывают задание на проектирование, проводят тендеры, заключают договоры и взаимодействуют между собой. Преподаватель выступает модератором и направляет действия команд.

Апробация игры показала высокую эффективность: 92 % студентов активно включились в процесс, закрепили полученные теоретические знания, получили практический опыт коммуникаций и приобрели навыки совместного принятия решений в условиях ограниченного времени, что оказало положительное влияние на успеваемость студентов по изучаемому предмету.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Фролова И.В.* Обучение иностранному языку в педагогическом вузе с ориентацией на поколение Z // Письма в Эмиссия.Оффлайн. 2025. № 3. С. 3497. EDN RFTQFV.
2. *Пищик В.И., Молохина Г.А.* Особенности внимания и памяти студентов — поколение Z в условиях цифровизации // Вестник Мининского университета. 2025. Т. 13. № 1 (50). DOI: 10.26795/2307-1281-2025-13-1-10. EDN OWMGDY.
3. *Вербицкий А.А.* Теория и технологии контекстного образования : учебное пособие. М. : МПГУ, 2017. 268 с. EDN LATCHI.
4. *Протасова Е.С., Гусев С.В., Калинина Е.С.* Деловая игра как средство формирования познавательного интереса студентов вуза // Наука и Образование. 2020. Т. 3. № 4. С. 376. EDN GFQWRX.
5. *Левченко О.Ю.* Использование деловых игр в обучении иностранному языку // Научные труды Северо-Западного института управления РАНХиГС. 2025. Т. 16. № 2 (69). С. 260–264. EDN RIQVYY.
6. *Гриневский С.О., Преображенская А.Е., Штенгелов Р.С.* Учебный программный комплекс EXPLAY: виртуальная разведка месторождения подземных вод в формате деловой игры // Разведка и охрана недр. 2025. № 2. С. 108–118. DOI: 10.53085/0034-026X_2025_2_108. EDN YLUUWS.
7. *Алексеева Ю.А., Барсукова М.И., Глибка М.С.* Деловая игра для специалистов служб ранней помощи по мотивам телеигры «Своя игра» // Лучшие практики ранней помощи Иркутской области. 2025. С. 99–110.
8. *Джафарова Н.Р., Ковалев А.Д., Курбанова О.В.* Деловая игра как средство развития универсальных компетенций студентов // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Психолого-педагогические науки. 2024. Т. 18. № 2. С. 42–48. DOI: 10.31161/1995-0659-2024-18-2-42-48. EDN TFYAVA.
9. *Кругликов В.Н.* Экспериментальные методы изучения теории в инженерном вузе // Образование и наука. 2018. Т. 20. № 6. С. 50–69. DOI: 10.17853/1994-5639-2018-6-50-69. EDN XSBWWL.
10. *Зборовский Г.Е., Дроздова А.А., Кеммет Е.В.* Концепция поколенческих взаимодействий в вузе: критический анализ отечественных и зарубежных теоретико-методологических подходов // Высшее образование в России. 2025. Т. 34. № 10. С. 27–46. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-10-27-46. EDN QTLGNN.
11. *Яруллина Л.Р.* Портрет цифрового поколения студентов: психологический контекст // Мир науки. Педагогика и психология. 2022. Т. 10. № 4. EDN VKUQOK.
12. *Миронова Л.И., Шатыбелко М.П.* Современные подходы к инженерно-строительному образованию в контексте цифровой трансформации отрасли // Наука и практика в образовании: электронный научный журнал. 2025. Т. 6. № 1. С. 36–44. DOI: 10.54158/27132838_2025_6_1_36. EDN YKQRXU.
13. *Укроженко Д.С., Неверова О.П., Степанов А.В., Павлова Я.С., Кураш Д.К.* Геймификация в высшем образовании: влияние игровых подходов

на мотивацию и академические достижения студентов // Право и управление. 2024. № 12. С. 479–483. DOI: 10.24412/2224-9133-2024-12-479-483. EDN DBJHOF.

14. Козлова Ю.Б. Геймификация в системе современного высшего образования: теоретические основы и практическая значимость // История и педагогика естествознания. 2022. № 1. С. 19–22. DOI: 10.24412/2226-2296-2022-1-19-22. EDN JQYNSY.

15. Захарова В.А. Студенты поколения Z: реальность и будущее // Научные труды Московского гуманитарного университета. 2019. № 4. С. 5. DOI: 10.17805/trudy.2019.4.5. EDN HBKXCB.

16. Печенёва Т.А. Студенты поколения Z — как понять и как научить? // Современные инновации. 2020. № 1 (35). С. 54–56. EDN PEQWMA.

17. Шевченко С.А., Кузьмина Е.В., Трунина В.Ф. Приоритеты студентов поколения Z: доминирующие компоненты процесса обучения в вузе // Вопросы жур-

налистики, педагогики, языкознания. 2025. Т. 44. № 1. С. 110–125. DOI: 10.52575/2712-7451-2025-44-1-110-125. EDN WWUZFV.

18. Боцьева Н.И., Голованова М.М., Бгуашева З.К. Геймификация в высшем образовании: педагогические принципы и методики реализации // Мир науки, культуры, образования. 2025. № 5 (114). С. 89–92. DOI: 10.24412/1991-5497-2025-5114-89-92. EDN ORRDJX.

19. Agapova T.V., Aisner L.Yu. Business game as a means of developing students' professional competencies // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. 2019. С. 251–254. EDN YAAHNB.

20. Lee Y.I., Yu T.K. Game-based learning enhances business decision-making learning for on-the-job MBA students: A case study of dynamic systems-thinking course // The International Journal of Management Education. 2025. Vol. 23. Issue 2. P. 101140. DOI: 10.1016/j.ijme.2025.101140. EDN EVRCGC.

Поступила в редакцию 23 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 9 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 22 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Ангелина Владимировна Корнева — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства, начальник центра управления проектами; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4267-9411, РИНЦ ID: 998363; lina.zagorskaya@gmail.com;

Марианна Борисовна Белугина — сертифицированный коуч международной ассоциации ICI, соучредитель Ассоциации психодинамических психотерапевтов, психолог, психоаналитик, эксперт; **Международный открытый социально-гуманитарный университет (МОСГУ);** 199178, г. Санкт-Петербург, 13-я линия Васильевского острова, д. 70; marianna_777@list.ru.

Вклад авторов:

Корнева А.В. — идея, сбор и обработка материала, подготовка сценария деловой игры с точки зрения организации строительного производства.

Белугина М.Б. — подготовка сценария деловой игры с точки зрения анализа поведения участников, мотивации и вовлечения студентов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

According to generational theory, today's students, born between 2000 and 2010, belong to generation Z. Empirical research indicates that members of generation Z possess a number of strengths that distinguish them from previous generations, including: digital literacy and rapid adaptation to new technologies, independent and flexible learning, a focus on concrete results, the ability to multitask, and the ability to switch quickly between tasks. Generational characteristics relating to the cognitive-stylistic and emotional-value spheres of the personality [1], including thinking style, the speed of perception and information processing, and the duration of concentration on various activities, are important from the perspective of organizing the educational process for students.

Generation Z's predisposition towards independent and flexible learning is reflected in a preference for concise formats: short videos and online courses, as well as the ability to switch rapidly between sources of knowledge and critically evaluate information. It is also noted [2] that members of generation Z are immersed in a digital environment whilst studying at university, which reduces their concentration during the learning process. Given the specific characteristics of how they perceive information, it is necessary to adapt the learning process and apply educational technologies tailored to the strengths of this generation. One method of enhancing the engagement, motivation and effectiveness of generation Z students is the "gamification" of learning and the integration of educational business games into

the teaching process, in addition to traditional lectures and practical sessions.

Business games, as a method of active learning, stimulate students' cognitive activity and enable them to gain experience in solving professional tasks by simulating a segment of professional activity and conditions that closely resemble real-life situations [3]. Researchers have found that when information is presented in the form of a business game, over 90 % of the material is retained [4]. Business games facilitate the resolution of cognitive and communicative tasks, serving both the students' interests (self-awareness, understanding their capabilities, leadership qualities and teamwork skills) and those of the lecturer (engaging in the teaching process, gaining insight into generation Z students through their behaviour during the game, accepting their characteristics and differences from other generations, the opportunity to utilize these characteristics for a successful educational process, and the opportunity to identify those students who are most motivated and ready to enter the workforce whilst still studying).

The lecturer's presence in the same gaming space as the students lends them greater significance and authority, strengthens goodwill and trust, reveals the lecturer's personality, and brings lecturers and students closer together in the professional and academic spheres, thereby contributing to the productivity of the learning process.

With regard to the module "Fundamentals of Construction Production Organization" (hereinafter referred to as the course), the aim of which is to develop students' competences in the field of construction project management, it should be noted that, in accordance with the syllabus, upon completion of the course students should have acquired a set of competences for the development of which active teaching methods are particularly appropriate, as they are capable of stimulating interest in the profession and practical activities. These include the following competences:

- UK-2: "*Able to identify the scope of tasks within the framework of a set objective and select the optimal methods for their resolution, based on applicable legal provisions, available resources and constraints*";
- UK-4 "*Able to engage in business communication, both orally and in writing, in the official language of the Russian Federation*";
- OPK-9 "*Able to organize work and manage a team within a production unit of an organization*".

The organization of construction operations is a multifaceted management task requiring both a broad range of theoretical knowledge and an understanding of legislative requirements, industry regulations, building codes and standards, as well as practical interpersonal skills and an understanding of the overall logic of the preparatory and production processes; specifically, business games are used to successfully simulate and study complex management issues in situations where diverse interests and resources must be coordinated within a single system. Furthermore, according to one existing

definition, a business game is "a pedagogical technique for simulating various managerial and operational situations, aimed at training individuals and groups in decision-making" [5]. Some examples of business games used in the educational process are presented in [6, 7]. Issues relating to the development of universal competences, the characteristics of generation Z, and the use of gamification and modern educational approaches in higher education institutions are examined in detail in a number of studies [8–20].

The business game scenario presented in this paper is based on the theoretical aspects of the discipline, as set out in detail in the textbooks^{1,2}, which are covered in the sections "Characteristics of the Construction Industry", "Construction Production Management", "Self-Regulation in Construction" and "Preparation for Construction Production" of the course lecture material.

The educational objectives of the business simulation are to integrate the theoretical knowledge acquired into a coherent system, presented in the form of a segment of professional practice, namely: knowledge of the parties involved in construction (the developer, the technical client, and design and survey organizations) and their interactions (conducting tenders, concluding contracts), the process of organizing work on a project (approval of design briefs, selection of contractors for design and survey work), and the organization's management structure (linear, functional and combined organizational structures); working with document templates modelled on those used in practice (design briefs, commercial proposals, contracts, certificates of completion and acceptance of works), as well as developing skills in conducting business negotiations.

MATERIALS AND METHODS

The following materials were used in developing the business game scenario: theoretical sources (textbooks and monographs on the subject "Fundamentals of Construction Project Organization", business games, pedagogical technologies and game-based learning, the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) syllabus, course code B1.O.26); empirical data (case studies of real companies acting as developers and technical clients for projects of various functional purposes, financed both through public funding and private funds, as well as design and survey organizations). Handouts were compiled in accordance with the requirements of current legislation and regulatory and technical documents.

In developing the scenario, content analysis (a review of existing case studies and teaching guides) and the scenario planning method were used to devise key game situations.

¹ Oleynik P.P. *Fundamentals of Organization and Management in Construction : a textbook*. Moscow, ASV, 2014; 200.

² Oleynik P.P. *Organization, Planning and Management in Construction : a textbook*. Moscow, ASV, 2015; 160.

RESEARCH RESULTS

Description of the scenario for the educational business game “Preparation for Construction Works”

The educational business game (hereinafter referred to as “the game”) is designed for 30–50 students. To ensure all participants are fully engaged in the game, an additional moderator must be brought in to assist the lead tutor (the game facilitator).

The game, in a simplified form but closely reflecting real-world practice, simulates the following processes:

- the development and approval of the design brief for a project;
- the selection of contractors for design and survey work;
- the conclusion of contracts between legal entities;
- development and approval of the facility design brief (DB);
- preparation for a tender for construction and installation works (CIW).

Prior to the business simulation, students must be familiar with the theoretical material of the course covering the following topics: key terms and definitions in the field of construction management; the life cycle (LC) of a capital construction project (CCP); partici-

pants in the construction process; interaction between participants in the construction process; organizational and legal forms of business organizations; organizational management structures; self-regulation in the construction industry.

The stages covered in the game are shown in Fig. 1.

The audience is divided into teams, each of which becomes a separate organization participating in the construction project. The composition of the participants is shown in Fig. 2.

To demonstrate differences in the organization of the process, the game features two developers (here and below, the terms are used in accordance with the Urban Planning Code of the Russian Federation³), one of which is a government agency and plans construction using budgetary funding (Federal State Budgetary Institution “Capital Construction”), whilst the other is a private organization (LLC “Moscow Developer”). Each developer carries out activities relating to a single CCP. Taking into account the organizational structure and staff responsibilities of LLC “Moscow Developer” set out below, it is assumed that this developer will delegate its functions to

³ Urban Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ of 29 December 2004 (as amended on 31 July 2025). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

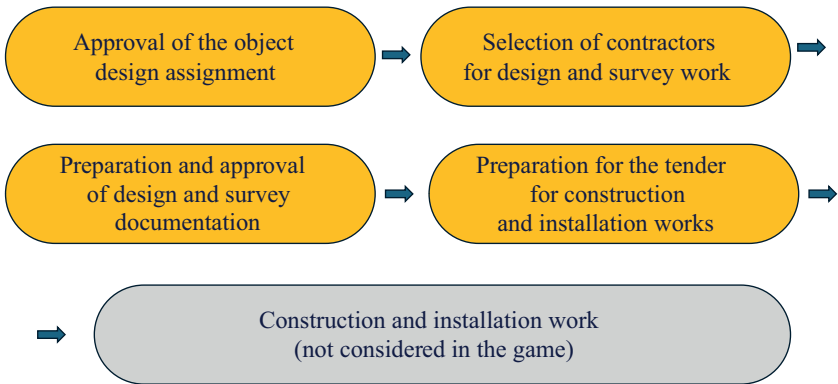


Fig. 1. Stages covered in the game

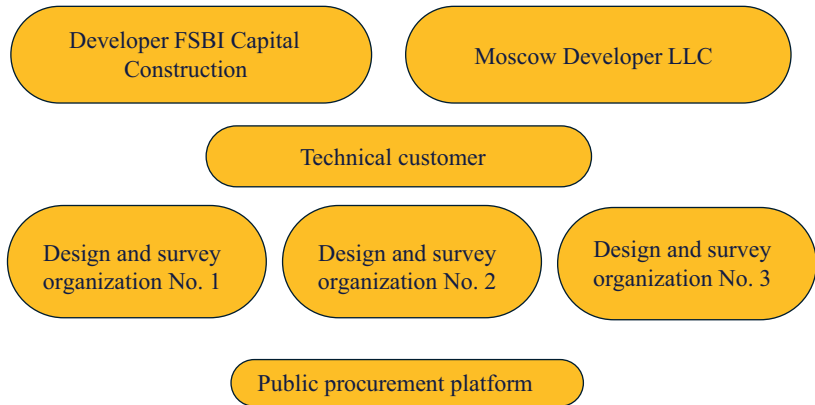


Fig. 2. Composition of the teams participating in the game

the technical client. Three equivalent design and survey organizations are present on the business game’s “market” to demonstrate a competitive environment. Each of these design and survey organizations may participate in the design and survey work for either of the two projects. The “public procurement platform” team simulates the operation of a unified information system in the field of procurement and participates in the tender organized

by the developer, the Federal State Budgetary Institution “Capital Construction”. Table 1 sets out the general background, objectives and tasks in the game for each participating team.

Table 2 presents, in simplified form, the staffing structure and organizational management structure of each organization (a functional management system, with all departments reporting to the Chief Executive), and sets

Table 1. General background, objectives and tasks in the game for each participating team

Number	General background	Objective in the game	Tasks in the game	Recommended number of students per team
1	2	3	4	5
Team 1. Developer: Federal State Budgetary Institution “Capital Construction”				
1	Is the developer of the CCP “Production Building”. 100,000 monetary units have been allocated to the project from the federal budget. The developer has no other funds. The production building needs to accommodate equipment occupying 50 m² (excluding the space required for administrative and staff facilities). The company has its own qualified specialists	Make the best use of the available budget. Prepare design and cost estimate documentation that will enable the construction of a facility meeting the specified requirements	To draw up and approve the design brief. Conduct a tender (No. 44-FZ) and enter into a contract with a design and survey organization. Accept the results of the work (design and survey documentation). Launch a tender for the construction work	7–10 people
Team 2. Moscow Developer LLC				
2	Is the developer of the CCP “Multi-storey residential building”. It has taken out a bank loan of 180,000 currency units. The developer has no other funds. There are no engineering or technical staff on the payroll	To build as many square metres of housing as possible. Prepare design and cost estimate documentation that will enable the construction of a development meeting the set objectives	Organize the preparation of the design and cost estimate documentation and enter into a contract with the technical client. Approve the design brief. Approve the design and survey documentation	3–5 people
Team 3. Technical client (name to be chosen by the students)				
3	Acts as the technical client; has its own qualified specialists on staff	Earn	To enter into a contract with the developer. Draw up the design brief. Conduct a tender and enter into a contract with a design and survey organization. Accept the deliverables (design and survey documentation) and hand them over to the developer	3–5 people
Teams 4, 5, 6. Design and survey organizations (names chosen by the students)				
4	Qualified design and survey organizations with relevant experience	Earn	Prepare to take part in tenders. Conclude a contract for the development of design and survey documentation. Develop the design and survey documentation. Deliver the results of the work	5–9 people in each team

End of the Table 1

Number	General background	Objective in the game	Tasks in the game	Recommended number of students per team
1	2	3	4	5
<i>Team 7. "Public Procurement" platform</i>				
5	The team will receive further instructions on the rules of procedure, what to look out for when checking documents, and the method for determining the winner (as set out in the handout)	Ensure the tender is conducted	Check the documentation received. Publicize the tender. Obtain commercial proposals. Determine the winner. Support the conclusion of the contract	2–3 people

Table 2. Staffing structure and organizational management structure for each participating team

Number	Position	Recommended tasks
1	2	3
<i>Team 1. Developer: Federal State Budgetary Institution "Capital Construction"</i>		
1.1	Chief Executive	Organize the work. Ensure the quality of the results. Present the results
1.2	Chief Engineer, engineering team	Prepare the technical requirements in the design brief
1.3	Finance Department	Allocate the budget (including determining and agreeing with the Chief Engineer the floor area of the proposed facility). Determine the initial maximum value of contracts for design and construction works
1.4	Contractor Relations Department	Prepare the tender requirements. Prepare the contract for signing. Arrange for the signing of handover certificates for completed works
<i>Team 2. Moscow Developer LLC</i>		
2.1	Chief Executive	Organize the work. Conduct negotiations with the technical client and agree on the terms of the work. Ensure the quality of the results. Present the results
2.2	Finance Department	Allocate the budget (including determining and agreeing with the Chief Executive the floor area of the proposed project). Determine the initial maximum value of contracts for design and construction works. Prepare the contract for signing. Organize the signing of handover certificates for completed works
<i>Team 3. Technical Client (name to be chosen by the students)</i>		
3.1	Chief Executive	Organize the work. Ensure the quality of the results. Present the results
3.2	Chief Engineer, engineering team	Prepare the technical requirements in the design brief
3.3	Finance Department	If necessary, reallocate the budget and determine the initial maximum value of contracts for design and construction works
3.4	Contractor Relations Department	Develop a procedure for selecting a contractor for the design and survey work. Prepare the contract for signing. Organize the signing of handover certificates for the work completed
<i>Teams 4, 5, 6. Design and survey organizations (names to be chosen by students)</i>		
4.1	Chief Executive	Organize the work. Ensure the quality of the results. Present the results

End of the Table 2

Number	Position	Recommended tasks
1	2	3
Teams 4, 5, 6. Design and survey organizations (names to be chosen by students)		
4.2	Chief Engineer, engineering team	Draw up design and survey documentation
4.3	Contractor Relations Department	Prepare for participation in the tender/selection of a contractor for the design and survey work. Prepare the contract for signing

out the recommended tasks. Each student participating in a team must be assigned a role within the organization or be assigned to a specific department.

The general background information required for all participants in the game is shown in Fig. 3.

The game is divided into four rounds, each lasting 10 minutes. During each round, the teams carry out the game tasks in the sequence shown in Fig. 4. The duration of each round and the composition of its activities may be adjusted by the game facilitator, taking into account the speed at which the teams complete the game tasks. The facilitator must guide the actions of each team,

ensuring synchronized progress towards the objectives. Minor details may be omitted (any errors can be discussed once the game is over). The most important aspects of the game are the participants' engagement and the development of an understanding of the professional activities of construction workers, carried out under tight deadlines and involving the parallel development of events across different sites.

At the end of each phase, the instructor summarizes the main events of the phase and their outcomes, and directs the teams' actions. At the end of the game, the lead instructor summarizes the results and analyses the course

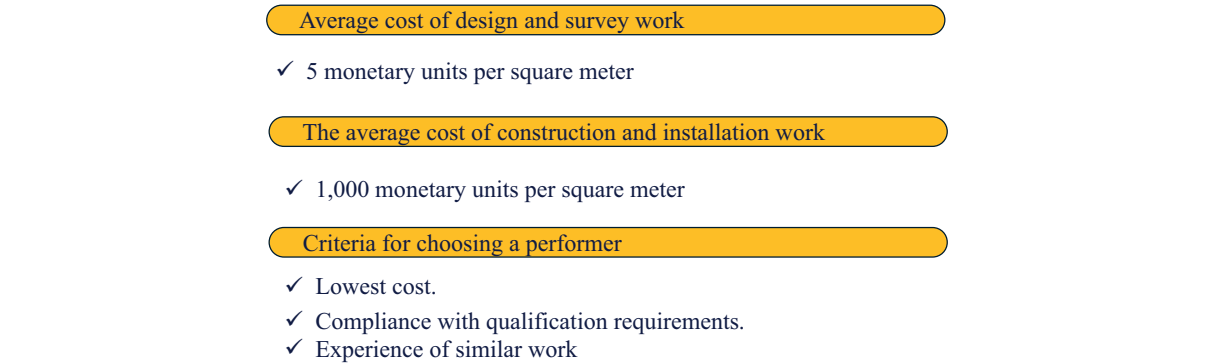


Fig. 3. General brief for game participants

	Round 1 (10 min)	Round 2 (10 min)	Round 3 (10 min)	Round 4 (10 min)
Federal State Budgetary Institution "Capital Construction"	Develops and approves the design brief. Announces a tender for design and survey work	Conduct a tender on the "Public procurement platform" and select the winner	Supervises	Approves the design and survey documentation
Design and survey organizations	Prepare to participate in the tender	Participate in the tender	The winning organization prepares the design and survey documentation and submits it to the client. Other organizations participate in the tender	One organization prepares the design and survey documentation. Submits the deliverables to the developer
Moscow Developer LLC	Agree on the terms and conclude a contract with each other	Approves the design brief. Supervises	Supervises	Supervises. Approves the design and survey documentation
Technical client		Develops the design brief. Determines the procedure for selecting a design and survey contractor	Selects a design and survey contractor. Concludes a contract for the preparation of the documentation	Reviews and approves. Submits the deliverables to the developer

Fig. 4. Game progression (basic plan)

Table 3. Criteria for assessing the results achieved by the teams

Number	Criteria for achieving game objectives	Criteria for completing game tasks
1	2	3
Team 1. Developer: Federal State Budgetary Institution “Capital Construction”		
1	Design and survey documentation has been drawn up for the “Production Building” project, with an area of >50 m². The allocated funds, net of actual design costs, are sufficient for the subsequent execution of construction and installation works on the project	The developer has drawn up and approved the design brief, and the technical and economic indicators for the project have been correctly determined (based on an average cost of 1 m² for design and construction works; the developer’s budget is sufficient for a building with an area of 99.5 m²; this figure is not the only correct one, as the team may opt for various strategies: to factor in a possible tender discount, to set aside reserves for unforeseen expenses, etc.). The design brief has been signed by the officials responsible for its preparation and approved by the signature of the organization’s chief engineer. A tender was conducted in accordance with the regulations of the “Public procurement platform”, and a contract was concluded with the design and survey organization. The contract sets out the main terms of the agreement (cost, deadlines, requirements for the deliverables). The contract was signed by the chief executive of each party. The design documentation handed over to the developer complies with the requirements of the design brief; the title pages of the design documentation have been signed by the officials responsible for its preparation and approved by the signature of the chief engineer of the design and survey organization. In accordance with the regulations of the “Public procurement platform”, a tender has been announced for the performance of construction and installation works on the project. The design and survey documentation has been submitted as the basis for the tender, and the initial maximum contract value for the construction and installation works has been determined
Team 2. Moscow Developer LLC		
2	The design and survey documentation for the “Multi-storey residential building” project has been drawn up. The allocated funds, net of actual design costs, are sufficient to cover the subsequent construction works on the project	A contract has been concluded with the technical client. The contract sets out the main terms of the agreement (cost, deadlines, requirements for the deliverables). The contract has been signed by the chief executive of each party. The terms of the transaction have been agreed at the level of the organizations’ chief executives. The main point of discussion is the cost of the technical client’s services. Based on the average cost 1 m² for design and construction works, the developer’s budget is sufficient for a building with an area of 179 m²; the larger the area the team was able to achieve, the more effective their actions were. The design brief has been signed by the relevant officials and the technical client responsible for its preparation, including the chief engineer; it has been approved by the developer’s chief executive and complies with the terms of the contract between the developer and the technical client. The design documentation handed over to the developer complies with the requirements of the design brief; the title pages of the design documentation have been signed by the officials responsible for its preparation, approved by the signature of the chief engineer of the design and survey organization, and agreed upon by the technical client

End of the Table 3

Number	Criteria for achieving game objectives	Criteria for completing game tasks
1	2	3
Team 3. Technical client (name chosen by the students)		
3	The cost of the work carried out, as per the handover certificate signed between the developer and the technical client (revenue), is greater than the cost of the work carried out, as per the handover certificate signed between the technical client and the design and survey organization (expense)	A contract has been concluded with the developer. The contract sets out the main terms of the transaction (cost, deadlines, requirements for the outcome). The contract has been signed by the chief executive of each party. The terms of the transaction have been agreed at the level of the organizations' chief executives. The developer has signed the technical client's handover certificate for the work completed. The handover certificate is signed by the chief executive of each party (based on the terms of the game, it is assumed that the developer will not sign the certificate until the technical client has fulfilled all its obligations). The main subject of discussion is the technical client's notional profit (the difference between income and expenditure). The team may choose various strategies, including but not limited to: selecting the optimal site area and negotiating with the client; negotiating with design and survey organizations to reduce the cost of their work. The greater the profit the team manages to achieve, the more effective their actions were
Teams 4, 5, 6. Design and survey organizations (names to be chosen by the students)		
4	A handover and acceptance certificate for the work carried out has been signed between the design and survey organization and the client (developer, technical client, or another design and survey organization), with the cost of the work carried out being greater than 0. If subcontracts were concluded, the cost of the work accepted under them must be deducted when estimating the notional profit	At least one contract for the preparation of design and survey documentation has been concluded. The client has signed the handover and acceptance certificate for the work carried out by the technical client. The handover and acceptance certificate is signed in person by the managing director on each side (based on the terms of the game, it is assumed that the client will not sign the certificate until the design and survey organization has fulfilled all its stipulated obligations). The main task of the design and survey organization is to select the optimal course of action, as different requirements are imposed on the participant for each project, and the process of selecting a contractor is organized differently for each. The design and survey organization may plan to participate specifically in the selection process for one of the projects, prepare to participate in the selection processes for both projects, or conduct negotiations with other construction participants, including joining forces with other design and survey organizations by participating jointly in the tender or being engaged as a subcontractor. The greater the profit the team was able to achieve, the more effective its actions were
Team 7. "Public Procurement" platform		
5	A tender for design and survey work on the "Production Building" project was held, and a winner was selected. A set of documents has been accepted for the tender for construction and installation works on the project	Unlike the other teams, the "Public Procurement" platform does not involve taking a proactive role in the game. The criterion for the team's effectiveness is the completion of the assigned tasks in accordance with the game rules. The most important factors are objectivity, thorough verification of incoming documents against the specified requirements, rejection of documents "on formal grounds" (where necessary) and accuracy in carrying out calculations

of events for each of the two sites. The criteria for the successful completion of the game are the teams’ fulfilment of the set game tasks and the achievement of the game objectives; details of these criteria are set out in Table 3.

Description of handouts for the game

The following handouts are recommended for the game:

1. Standard form for a design brief for a CCP, approved by Order of the Russian Ministry of Construction⁴. An abridged “draft version” may be prepared, including guidance on how to complete the form (2–4 copies).
2. A template contract for the performance of works (provision of services). The contract template must include the key provisions set out in the Civil Code⁵ of the Russian Federation: preamble, subject matter of the contract, deadlines for completion of the work, cost of the work and payment terms, rights and obligations of the parties, procedure for handover and acceptance of the work, details and signatures of the parties (6–8 copies).
3. A free-form commercial proposal template containing details of the tenderer’s name, the subject of the procurement, the proposed cost and deadlines for completion of the work, details of the tenderer’s qualifications, details of experience in carrying out similar work, and other relevant information (8–10 copies).

⁴ The Approval of the Standard Form of Design Brief for Capital Construction Projects and Requirements for its Preparation : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 125/pr of 1 March 2018, as amended on 2 March 2022, Collection of Legislation of the Russian Federation. 2018. No. 13. Art. 1702.

⁵ Civil Code of the Russian Federation. Part 1 : Federal Law No. 14-FZ of 26 January 1996, Collection of Legislation of the Russian Federation. 1996. No. 5. Art. 410.

4. A template for the handover and acceptance certificate for works under the contract, in the form recommended by Order No.⁶ of the Ministry of Construction of Russia, Annex No. 4: Handover and Acceptance Certificate for Completed Works (6–8 copies).
5. Template for the title page of design and survey documentation in the form set out in Annex R of the state standard⁷ (10–12 copies).
6. General project brief (7 copies).
7. Regulations for the operation of the public procurement platform, in free form, specifying: mandatory requirements for the design organization (membership of a self-regulatory organization for surveying and design), requirements for the set of documentation to be submitted (including details of the developer, the subject of the procurement, the estimated (maximum) cost of design) and survey work/construction and installation works, and the criteria for determining the successful bidders (recommended weights: 60 % — cost, 10 % — timeframe, 30 % — experience). An example calculation and a template for the calculation, recommended for inclusion in the handouts, are shown in Fig. 5.
- Depending on the estimated duration of the game, the level of detail in the handouts may vary. To adhere to the timing set out in the scenario, it is assumed that the handouts are pre-filled with all data, except for those details that are determined during the course of the game.

⁶ The approval of the Model State (Municipal) Contract for the construction (reconstruction) of a capital construction project and the information sheet for the said model contract : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 398/pr of 5 July 2018 (as amended on 20 June 2019) (registered with the Ministry of Justice of Russia on 10 October 2018, No. 52383).

⁷ GOST R 21.101–2020. System of design documentation for construction. Basic requirements for design and working documentation. Moscow, Standardinform, 2020; 28.

Calculation example

Criteria	Offer 1			Offer 2			Offer 3		
Cost	100 rubles	2	= 2 · 0.6 = 1.2	80 rubles	3	= 3 · 0.6 = 1.8	120 rubles	1	= 1 · 0.6 = 0.6
Term	5 min	2	= 2 · 0.1 = 0.2	10 min	1	= 1 · 0.1 = 0.1	3 min	3	= 3 · 0.1 = 0.3
Experience	5 projects	3	= 3 · 0.3 = 0.9	1 project	1	= 1 · 0.3 = 0.3	3 projects	2	= 2 · 0.3 = 0.6
The amount of points		Σ	2.3			Σ	2.2	Σ	1.5

The winner is Offer 1

The template for the calculation

Criteria	Offer 1			Offer 2			Offer 3		
Cost									
Term									
Experience									
The amount of points		Σ				Σ		Σ	

Fig. 5. Example of an extract from handouts for the “Public Procurement Platform” team

It should be noted that face-to-face communication, as opposed to digital communication, and the paper version of documents in the form of handouts are more challenging for generation Z; at the same time, they help prepare them for future working life, where they will encounter various forms of workplace and collegial communication.

Description of the business game

1. The lecturer (game facilitator) announces the start of the educational business game “Preparation for Construction”. The lecturer provides the following guidelines for the game:

- during the game, participants must apply the theoretical knowledge they have previously acquired;
- it is recommended that you use your imagination and come up with any missing background information yourselves, as the main aim of the game is to familiarize yourselves with the process of organizing a construction project;
- this is an educational game, i.e. it is acceptable to make mistakes, ask questions and use any materials and sources. The main criterion is the student’s active participation and engagement in the game (the possibility of making mistakes is understood by the gamer generation,

and in the context of the game, it provides an opportunity for creativity and for modelling various scenarios, thereby further enhancing their understanding of the subject);

- during the game, students are asked to take on their roles and not to forget to step out of them once the game is over.
2. The lecturer introduces the audience to the roles proposed in the game, whilst at the same time dividing the participants into seven teams.
3. The lecturer introduces the audience to the background information on each participant, as well as the aims and objectives of the game. This involves presenting the information set out in Table 1. A possible example of a slide design for presenting this background information is shown in Fig. 6.
4. Once each team has familiarized itself with the aims and objectives, roles (positions) are allocated within the organization. This involves presenting the information set out in Table 2. A possible example of a slide layout for presenting the introductory information is shown in Fig. 7.
5. The lecturer presents the general introductory information shown in Fig. 3 and explains the course of the game as illustrated in Fig. 4. They answer students’ questions.

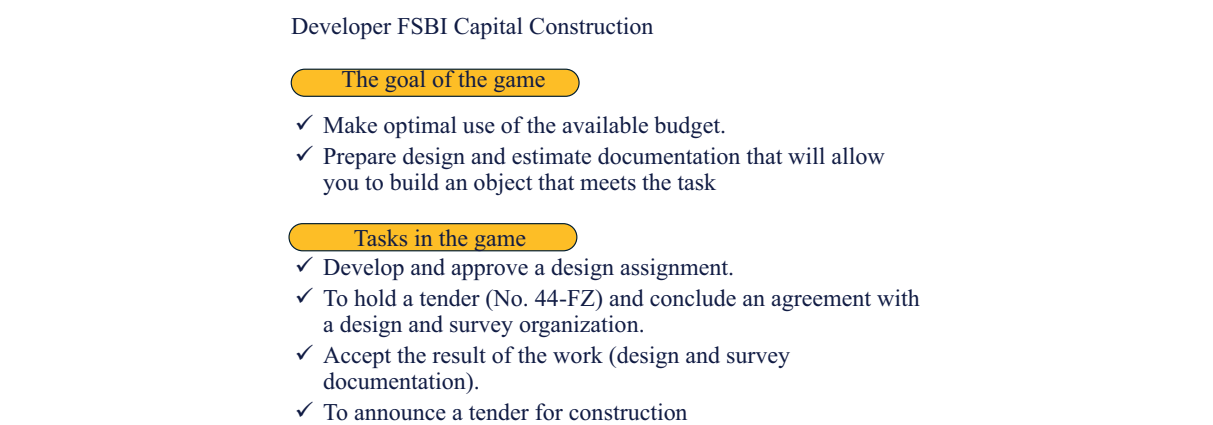


Fig. 6. An example illustrating the introductory information set out in Table 1

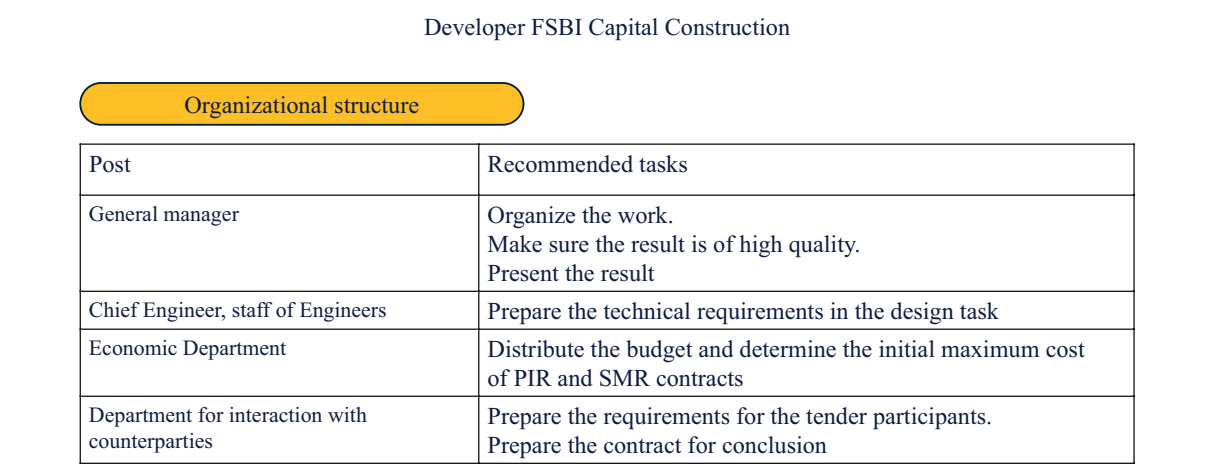


Fig. 7. Example of a presentation of the introductory information listed in Table 2

6. The lecturer invites the students, who are acting as chief executive officers of organizations, to familiarise themselves with the handouts provided. They answer questions and give instructions for the first round of the game.

7. The lecturer signals the start of the first round of the game and times it. During the first round, the “Public Procurement Platform” team must be given further instructions; with the help of a moderator, they should guide the actions of the teams acting as developers and coordinate the actions of the other teams. At the end of the round, the lecturer briefly announces the results achieved and gives instructions for the second round.

8. The tutor signals the start of the second round of the game and starts the stopwatch. At the start of the second round, the tutor or the “Public Procurement Platform” makes a verbal announcement regarding the tender, sets out the main conditions, and announces the dead-line for submitting bids (in minutes). During this round, with the help of the moderator, the instructor must guide the actions of the teams acting as design and survey organizations and the technical client, whilst coordinating the actions of the other teams. At the end of the round, the instructor briefly summarizes the results achieved and gives instructions for the third round.

9. The tutor signals the start of the third round of the game and starts the timer. During this round, with the help of the moderator, the instructor must guide the actions of the teams acting as design and survey organizations and the developer “FSUE Capital Construction”, whilst coordinating the actions of the other teams. At the end of the round, the instructor briefly announces the results achieved and gives instructions for the fourth round.

10. The lecturer signals the start of the fourth round of the game and times it. During this round, with the help of the moderator, the actions of all teams must be directed and coordinated with a view to achieving the game’s objectives or interim results. At the end of the round, the teacher invites the students acting as chief executives of all the organizations to jointly announce the results achieved by each organization and analyze the course of events for each of the entities considered in the game. The teacher highlights the most successful moments of the game.

11. The game concludes with a general reflection session. Examples of questions the tutor might ask to facilitate reflection:

- which of the teams’ decisions were effective;
- which of the team’s decisions did not work;
- what was learnt during the game;
- which aspects remained unclear.

12. The teacher thanks the students for taking part in the game.

Testing and implementation

The business simulation, in accordance with the proposed scenario, was conducted in October 2025 as

a supplement to the lecture material for the course “Fundamentals of Construction Production Organization” for third-year students at the Institute of Economics, Management and Communications in Construction and Real Estate. Forty-six students took part in the simulation, of whom:

- 42 students were actively involved in the game and took part in group work (92 % of the total);
- 2 students experienced difficulties due to a language barrier; they observed the game and were individually familiarized with the document templates used in the game (4 % of the total);
- 2 students did not participate in team work of their own accord; they observed the game, were individually briefed on the document templates used in the game, and asked the lecturer a number of clarifying questions on the subject matter (4 % of the total).

The business simulation was conducted by a single lecturer, with the assistance of one moderator, which enabled the lecturer to monitor and guide the actions of all teams. The total duration was 70 minutes, comprising 10 minutes for explaining the rules of the game, 50 minutes for the main gameplay, and 10 minutes for summarizing the results.

Teams were formed by grouping together students sitting next to one another. When assigning roles within each team, the CEO was appointed first. In five of the six teams, the students chose their CEO themselves. In one team, the CEO was appointed by the lecturer. During the game, all six teams worked in accordance with the recommended division of responsibilities amongst participants. In one team, the group work proved to be the most effective: participants each worked on their own section in parallel, whilst the CEO coordinated the results and liaised with “external counterparties”. In one team, the Chief Executive Officer faced difficulties in delegating and ended up working independently or finalizing the outcome for each set of issues. Each team gained experience of collaborating within the organization’s management structure.

During the business simulation, the team playing the role of the developer “FSUE «Capital Construction»”, with the participation of teams playing the roles of “Public Procurement Platform” and “Design and Survey Organization No. 3”, managed to complete the prescribed game process from the stage of approving the design brief to the stage of approving the design and survey organization, including the signing of the necessary contracts and acceptance certificates for the work carried out. During the tender process, the winners were announced as the sole organization that had correctly submitted a bid (the second bidder failed to meet the statutory tender deadlines, whilst the third bid was rejected on procedural grounds — the subject of the procurement had been incorrectly specified). As a set of documents simulating design documentation, the team of “Design and Survey

Organization No. 3” prepared title pages of the design documentation signed by the responsible persons, as well as improvised drawings for the Site Planning Scheme (SPS) and Structural Solutions (SS) sections, using students’ personal materials.

The team playing the role of the developer, “Moscow Developer” Ltd, with the participation of the “Technical Client” and “Design and Survey Organization No. 1” teams, “Design and Survey Organization No. 2”, managed during the game to approve the design brief and conclude contracts between the parties involved in the process: “developer” – “technical client”, “technical client” – “Design and Survey Organization No. 2”, “Design and Survey Organization No. 2” – “Design and Survey Organization No. 1”. The students independently decided to engage Design and Survey Organization No. 1 as a subcontractor to develop specific sections of the design documentation. The process of developing the project documentation was not completed due to the considerable time required for negotiations between the participants. However, all teams agreed on the commercial terms of the contracts and the requirements for the deliverables, including the technical and economic indicators for the facilities. During the business negotiations, the students gained an understanding of planning and management processes in situations where diverse interests and resources must be integrated within a single system.

The overall results of the simulation were assessed by the lecturer as a successful experience in consolidating the theoretical knowledge acquired in specific sections of the course “Fundamentals of Construction Management”, an opportunity for future specialists to develop communication skills and engage in joint decision-making under time pressure, and a means of fostering creative professional thinking. The simulation had a positive impact on the students’ academic performance in the subject.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The business simulation “Preparation for Construction Production” is a supplementary educational method for teaching students on construction courses. The game has been developed with the characteristics of generation Z in mind and is aimed at developing professional competences in the field of construction project management. Gaining an understanding of their future professional activities, in turn, helps students to reflect on their role, aspirations and opportunities in their forthcoming professional careers and future working lives.

The game’s methodology is based on active learning methods and involves simulating real-life production processes. Students are divided into teams, each of which plays the role of a specific participant in the construction process: a developer, a technical client or a design and survey organization. Working in small groups helps to engage every member of the group in the process and provides an opportunity for further analysis, both for the lecturer and for each student individually.

The main value of this methodology lies in the integration of theoretical knowledge with practical management skills in the construction industry through game-based simulation of professional activities, which has a positive effect on both students and the lecturer.

The game process comprises four stages, during which participants carry out professional tasks: they draw up design briefs, conduct tenders, conclude contracts and interact with one another. The lecturer acts as a moderator and guides the teams’ actions.

Trials of the game demonstrated high effectiveness: 92 % of students actively engaged in the process, consolidated the theoretical knowledge they had acquired, gained practical experience in communication, and developed skills in collaborative decision-making under time constraints, which had a positive impact on the students’ academic performance in the subject.

REFERENCES

1. Frolova I.V. Teaching a foreign language at a pedagogical university with a focus on generation Z. *The Emisia. Offline Letters*. 2025; 3:3497. EDN RFTQFV. (rus.).
2. Pishchik V.I., Molokhina G.A. Features of attention and memory of students — generation z in the context of digitalization. *Vestnik of Minin University*. 2025; 13(1):(50). DOI: 10.26795/2307-1281-2025-13-1-10. EDN OWMGDY. (rus.).
3. Verbitsky A.A. *Theory and Technologies of Contextual Education : textbook*. Moscow, MPSU, 2017; 268. EDN LATCHI. (rus.).
4. Protasova E.S., Gusev S.V., Kalinina E.S. Business game as a means of forming the cognitive interest of university students. *Science and Education*. 2020; 3(4):376. EDN GFQWRX. (rus.).
5. Levchenko O.Yu. The use of business games in teaching foreign languages. *Scientific Works of the North-West Institute of Management of RANEPa*. 2025; 16(2):(69):260-264. EDN RIQVYY. (rus.).
6. Grinevskiy S.O., Preobrazhenskaya A.E., Shtengelov R.S. Educational software package explay: virtual groundwater exploration in the format of a business game. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2025; 2:108-118. DOI: 10.53085/0034-026X_2025_2_108. EDN YLUUWS. (rus.).
7. Alekseeva Yu.A., Barsukova M.I., Glibko M.S. A business game for early intervention specialists based on the TV game show “Svoya Igra”. *Best Practices in Early Intervention in the Irkutsk Region*. 2025; 99-110. (rus.).

8. Jafarova N.R., Kovalev A.D., Kurbanova O.V. Business game as a means of developing students' universal competencies. Dagestan State Pedagogical University. Journal. *Psychological and Pedagogical Sciences*. 2024; 18(2):42-48. DOI: 10.31161/1995-0659-2024-18-2-42-48. EDN TFYAVA. (rus.).
9. Kruglikov V.N. Experiential methods of studying theory at engineering universities. *Education and Science Journal*. 2018; 20(6):50-69. DOI: 10.17853/1994-5639-2018-6-50-69. EDN XSBWWL. (rus.).
10. Zborovsky G.E., Drozdova A.A., Kemmet E.V. The concept of intergenerational interactions in higher education: a critical analysis of domestic and foreign theoretical and methodological approaches. *Higher Education in Russia*. 2025; 34(10):27-46. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-10-27-46. EDN QTLGGN. (rus.).
11. Yarullina L.R. Portrait of the digital generation of students: psychological context. World of Science. *Pedagogy and psychology*. 2022; 10(4). EDN BKUQOK. (rus.).
12. Mironova L.I., Shatybelko M.P. Modern approaches to civil engineering education in the context of digital transformation of the industry. *Science and Practice in Education: Electronic Scientific Journal*. 2025; 6(1):36-44. DOI: 10.54158/27132838_2025_6_1_36. EDN YKQRXU. (rus.).
13. Ukrozhenko D.S., Neverova O.P., Stepanov A.V., Pavlova Ya.S., Kurash D.K. Gamification in higher education: the impact of game-based approaches on students' motivation and academic achievement. *Law and Management*. 2024; 12:479-483. DOI: 10.24412/2224-9133-2024-12-479-483. EDN DBJHOF. (rus.).
14. Kozlova Yu.B. Gamification in the system of modern higher education: theoretical foundations and practical significance. *History and Pedagogy Natural Science*. 2022; 1:19-22. DOI: 10.24412/2226-2296-2022-1-19-22. EDN JQYNSY. (rus.).
15. Zakharova V.A. Students of generation Z: reality and future. *Nauchnye trudy Moskovskogo gumanitarnogo universiteta*. 2019; 4:5. DOI: 10.17805/trudy.2019.4.5. EDN HBKXCB. (rus.).
16. Pecheneva T.A. Generation Z Students: How to Understand and How to Teach? *Modern Innovations*. 2020; 1(35):54-56. EDN PEQWMA. (rus.).
17. Shevchenko S.A., Kuzmina E.V., Trunina V.F. Priorities of generation z students: dominating components of the university learning process. *Issues in Journalism, Education, Linguistics*. 2025; 44(1):110-125. DOI: 10.52575/2712-7451-2025-44-1-110-125. EDN WWUZFW. (rus.).
18. Botsieva N.I., Golovanova M.M., Bguasheva Z.K. Gamification in higher education: pedagogical principles and methods of implementation. *The world of science, culture and education*. 2025; 5(114):89-92. DOI: 10.24412/1991-5497-2025-5114-89-92. EDN ORRDJX. (rus.).
19. Agapova T.V., Aisner L.Yu. Business game as a means of developing students' professional competencies. *Science and Education: Experience, Problems, and Development Prospects*. 2019; 251-254. EDN YAARHB.
20. Lee Y.I., Yu T.K. Game-based learning enhances business decision-making learning for on-the-job MBA students: A case study of dynamic systems-thinking course. *The International Journal of Management Education*. 2025; 23(2):101140. DOI: 10.1016/j.ijme.2025.101140. EDN EVRCGC.

Received March 23, 2026.

Adopted in revised form on April 9, 2026.

Approved for publication on April 22, 2026.

BIONOTES: **Angelina V. Korneva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Head of the Project Management Center; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4267-9411, ID RSCI: 998363; lina.zagorskaya@gmail.com;

Marianna B. Belugina — certified coach of the International ICI Association, co-founder of the Association of Psychodynamic Psychotherapists, psychologist, psychoanalyst, expert; **International Open University of Social Sciences and Humanities**; 70 13th Line of Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; marianna_777@list.ru.

Contribution of the authors:

Angelina V. Korneva — the idea, collection and processing of material, preparation of the scenario of a business game from the point of view of the organization of construction production.

Marianna B. Belugina — preparation of a business game scenario from the point of view of analyzing the behavior of participants, motivation and involvement of students.

The authors declare that there is no conflict of interest.