

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том **15** выпуск **4 (58)**

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 29.12.2025.

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

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2025

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 Акинтосе, 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	
Б. Ананд, Н. Сетев, Д. Далай, А. Ганболд Construction of enclosing structures of deep excavation pits of buildings constructed in Ulaanbaatar 6	
П.П. Гайджуrow, Н.Г. Царитова, Н.А. Корчагин Численное моделирование процесса формоизменения регулярно-стержневой гексагональной решетки при дискретном кинематическом воздействии..... 15	
А.Р. Долгер, Н.Г. Канев Влияние параметров шумозащитного экрана решетчатого типа на его акустическую эффективность..... 31	
АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ	
А.А. Федоровская, Д.С. Вышлова Теоретико-методический подход к формированию опорных населенных пунктов для обеспечения сбалансированного устойчивого развития субъекта РФ 44	
Е.О. Савельева Пространственные характеристики городской среды как факторы доступности..... 68	
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ	
В.В. Волгин, Р.О. Самсонов, М.О. Кузьмич Система классификации и оценки территориальных рисков при строительстве гражданских объектов в Арктике 84	
Ю.Ю. Ивакина, И.О. Ратущин Анализ подходов к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта 97	
Н.А. Субботина, А.Н. Никулин Необходимость использования имитации последствий нарушений в рамках обучения безопасным методам и приемам выполнения работ..... 114	
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
И.О. Раббаа, О.А. Ларсен Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при адгезии материалов для 3D-печати 129	
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
П.А. Кравченко, Ю.Г. Жеглова Применение технологий искусственного интеллекта для разработки проектов по реконструкции зданий..... 140	
Р.О. Самсонов, В.С. Лоткин Организационно-технологические решения строительства центров обработки данных под нагрузкой искусственного интеллекта: требования, риски, регламенты..... 154	

CONTENT

BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS	
Batsaikhan Anand, Nyamdorj Setev, Dashjams Dalai, Adyajav Ganbold Construction of enclosing structures of deep excavation pits of buildings constructed in Ulaanbaatar 6	
Peter P. Gaydzhurov, Nadezhda G. Tsaritova, Nikita A. Korchagin Numerical simulation of the shaping process of a regular-rod hexagonal lattice under discrete kinematic action..... 15	
Alexandr R. Dolger, Nikolay G. Kanev The influence of the parameters of a lattice-type noise shield on its acoustic efficiency..... 31	
ARCHITECTURE. RECONSTRUCTION. RESTORATION. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT	
Albina A. Fedorovskaya, Daria S. Vyshlova Theoretical and methodological approach to the formation of key settlements to ensure balanced sustainable development of a constituent entity of the Russian Federation 44	
Ekaterina O. Saveleva Spatial characteristics of the urban environment as factors of accessibility 68	
ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY	
Valentin V. Volgin, Roman O. Samsonov, Maxim O. Kuzmich System for classifying and assessing territorial risks in the construction of civil facilities in the Arctic..... 84	
Yulia Yu. Ivakina, Ivan O. Ratushny Analysis of approaches to the design of medical institutions during capital repair 97	
Nadezhda A. Subbotina, Andrey N. Nikulin The need to use simulations of the consequences of violations as part of training in safe working methods and techniques..... 114	
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS. TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIALS PRODUCTION. NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	
Ilya O. Rabbaa, Oksana A. Larsen Compatibility of viscosity modifiers and water repellent on adhesion of 3D printing materials..... 129	
INFORMATION SYSTEMS AND LOGISTICS IN CONSTRUCTION	
Pavel A. Kravchenko, Yulia G. Zheglova The use of artificial intelligence technologies for the development of building renovation projects 140	
Roman O. Samsonov, Victor S. Lotkin Organizational and technological solutions for data centres construction under AI workloads: requirements, risks, and regulations 154	

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

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.1

Construction of enclosing structures of deep excavation pits of buildings constructed in Ulaanbaatar

Batsaikhan Anand, Nyamdorj Setev, Dashjamts Dalai, Adyajav Ganbold

Mongolian University of Science and Technology; Ulaanbaatar, Mongolia

ABSTRACT

When constructing multi-story and high-rise buildings in limited spaces of large cities due to lack of area for construction, optimal design of enclosing structures that protect against collapse of the excavation pit wall and against technological and non-technological negative impacts on buildings located in the zone of influence of new construction is one of the urgent geotechnical problems. In connection with intensive construction in large cities of Mongolia, the issue of the optimal solution to this problem becomes relevant. This article discusses the results of the calculation and design solution of the enclosing structure erected taking into account the soil conditions of Ulaanbaatar.

KEYWORDS: regional feature, coarse-grained soil with clay filler, horizontal load, displacement, buildings located in zones of influence

FOR CITATION: Anand B., Setev N., Dalai D., Ganbold A. Construction of enclosing structures of deep excavation pits of buildings constructed in Ulaanbaatar. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.1

Correspondent author: Nyamdorj Setev, nmdrj.s@gmail.com.

Строительство ограждающих конструкций глубоких котлованов зданий, возводимых в Улан-Баторе

Батсайхан Ананд, Нямдорж Сетев, Дашджамц Далай, Адьяджав Ганболд

Монгольский университет науки и технологий; г. Улан-Батор, Монголия

АННОТАЦИЯ

При строительстве многоэтажных и высотных зданий в ограниченных пространствах крупных городов из-за нехватки площадей под застройку одной из актуальных геотехнических задач является оптимальное проектирование ограждающих конструкций, защищающих от обрушения стен выемки грунта и от технологических и нетехнологических негативных воздействий на здания, расположенные в зоне влияния нового строительства. В связи с интенсивным строительством в крупных городах Монголии вопрос об оптимальном решении этой проблемы становится актуальным. Рассматриваются результаты расчета и проектного решения ограждающей конструкции, возведенной с учетом грунтовых условий Улан-Батора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: региональная особенность, крупнозернистый грунт с глинистым наполнителем, горизонтальная нагрузка, смещение, здания, расположенные в зонах воздействия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ананд Б., Сетев Н., Далай Д., Ганболд А. Construction of enclosing structures of deep excavation pits of buildings constructed in Ulaanbaatar // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.1

Автор, ответственный за переписку: Нямдорж Сетев, nmdrj.s@gmail.com.

INTRODUCTION

The urban development direction of Mongolia, especially the construction of high-rise buildings in the city of Ulaanbaatar, dictates the issue of rational use of the underground space of the built-up area, as a result of which the assessment of the impact of the work carried out on the development of the pit on the wound of built-up buildings and on underground pipelines is relevant.

The analytical solution of the problem of determining the quantitative assessment of the stress-strain state of the enclosing structure and the foundation soil was carried out in a flat formulation. In this solution, it is impossible to take into account and evaluate additional deformations arising in soil massifs and structures of new and existing buildings. Therefore, at present, the problem of determining the joint work of the supporting structures of a newly constructed building and nearby buildings is solved in a spatial formulation by the method of numerical modelling based on the finite element method using various software packages.

In the practice of solving geotechnical problems, including for the design of the enclosing structure of a construction pit, numerical methods are widely used using calculation software packages based on the finite element method, which allow you to estimate the stress-strain state of the soil of the foundations of newly erected and previously built-up buildings located in the zone of influence of construction work. To study the issues of numerical modelling of the stress-strain state of the soil of the foundations of newly erected and previously built-up buildings, the works of G. Dalerçi et al. are devoted [1], A.B. Fadeev [2], L. Zdravkovic et al. [3], M.A. Bezgadov et al. [4], J.P. Carter et al. [5], G.T.C. Kung et al. [6], A.I. Golubev et al. [7] and others.

The works of P.G. Hsieh et al. [8], V.A. Ilyichev et al. [9], C. Moormann et al. [10], D.E. Razvodovsky et al. [11], V.I. Telichenko et al. [12], M. Son et al. [13], D.S. Konyukhov et al. [14], V.V. Znamensky et al. [15], S. Nyam-

dorj et al. [16], V.Yu. Leushin et al. [17] and others are devoted to the optimal solution of the problems of calculation, design and construction of deep excavations and their enclosing structures.

During construction in a limited urban development site, during mandatory geotechnical monitoring to determine the technical condition of nearby buildings, and also monitoring of additional technological settlement of buildings and movement of the pit fence, while the horizontal deviation of the pit fence is standardized from the point of view of the strength and rigidity of the supporting structure. It is important to note that the permissible bending of the pit fence can lead to significant deformations of the foundation of new and existing buildings and the development of limit state zones in the soil massif of the foundation.

MATERIALS AND METHODS

The enclosing structures of pits are erected in Ulaanbaatar by various methods, including the use of metal sheet piles, I-beams and tubular structures with a wooden filler, bored piles. And the classic method of erecting a “wall in the ground” of the trench type has not yet been implemented, due to the lack of design experience and special techniques for this work.

Currently, the construction of urban underground structures of civil buildings and pipelines in our country is carried out by an open method of excavation of pit soils. The depth of their pit can most often reach 5.0–9.0 m in practice for 1–3 underground floors in soil conditions of coarse-grained and clayey soils, mainly in the presence of groundwater. As an example, below is considered the calculation of the enclosing structure of a deep pit of an 8-story hospital building.

Engineering and geological conditions. The 8-story hospital building (56 × 6 m) was planned with two-story basements on a reinforced concrete slab foundation (Fig. 1, 2), monolithic frame structure, gravelly loam soil foundation (Table).

Physical and mechanical properties of soil

Soil name	IGE	Parameters of soil's					
		$\rho_s, \text{g/sm}^3$	e	E, MPa	C, kPa	φ, grade	R_0, kPa
Gravel with sandy loam fillers, semi-solid consistency	IGE-1	2.22	0.35	48	9.3	39	450
Gravel with loamy fillers, semi-solid consistency	IGE-2	2.21	0.36	41	7.3	36	450
Gravelly loams, fluid consistency	IGE-3	2.22	0.20	19	19	17	250

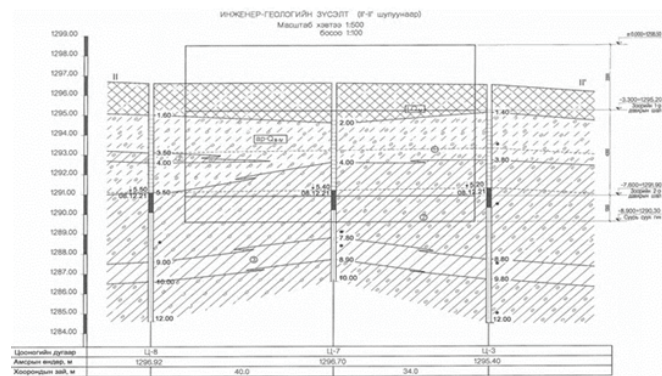


Fig. 1. Engineering-geological section

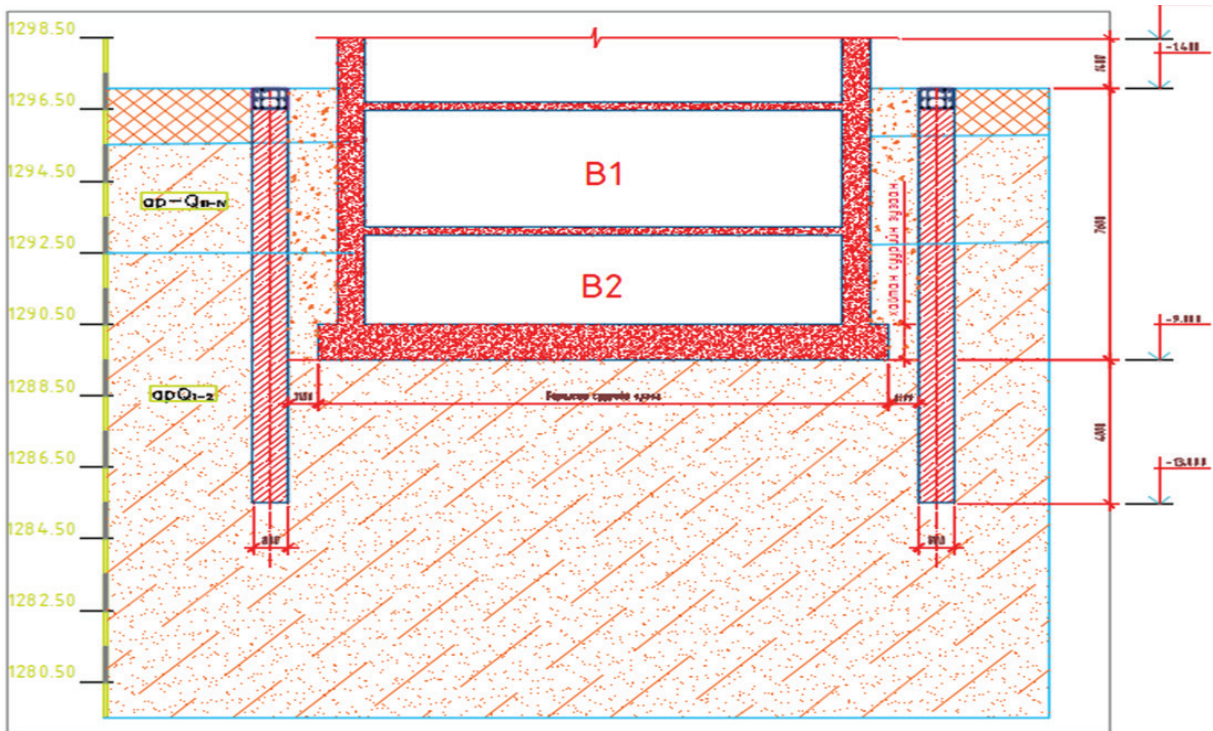


Fig. 2. Calculation scheme of the enclosing structure

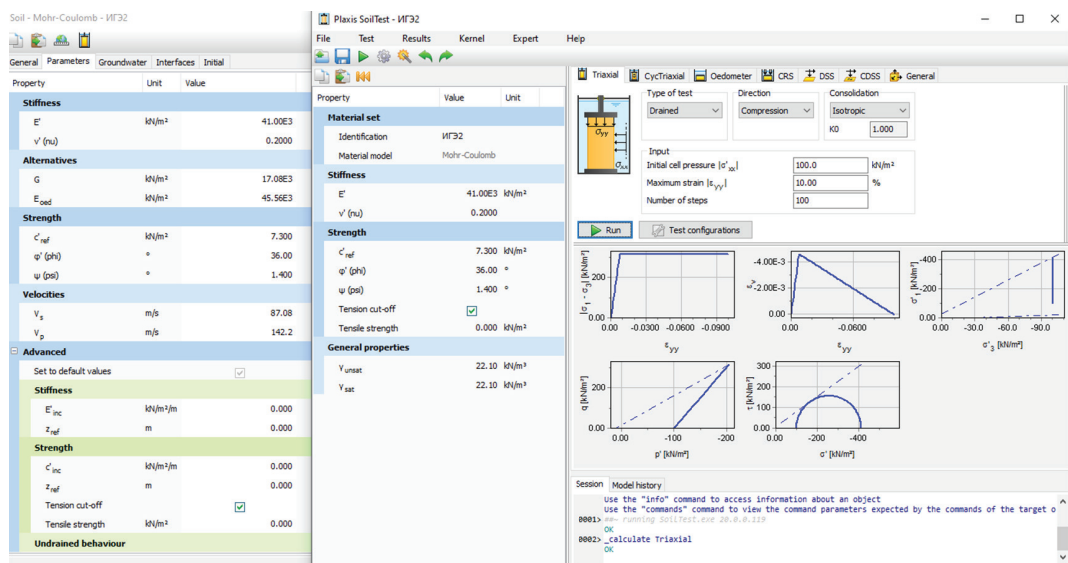


Fig. 3. Calculated data of soils

This numerical calculation was carried out using the software package Palaxis 3D, the calculated indicators of the building foundation soils were modeled in accordance with the methods described in the works of R.A. Mangushev et al. [18], PLAXIS Finite Element Code¹. Calculation scheme of the enclosing structure (Fig. 3).

RESULTS

Determination of the bending rigidity of piles of the enclosing structure (Fig. 4):

- EA — compressive rigidity of piles;
- EJ — bending rigidity of piles;

¹ PLAXIS — Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. User's Guide. Version 7. Saint Petersburg, NIP-Informatika, 2004; 274.

$E = 3 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ — modulus of deformation of reinforced concrete;

$EA = 3 \cdot 10^7 \cdot d \cdot 1 \text{ pm}/0.85 = 3 \cdot 10^7 \cdot 0.8 \cdot 1/0.85 = 28.235 \cdot 10^6 \text{ kN/m};$

$J = (\pi D^4)/64; m^4$ — pile rigidity, where D — pile diameter;

$EJ = 3 \cdot 10^7 \cdot \frac{d^3 \cdot 1 \text{ pm}}{12 \cdot 0.85} = 3 \cdot 10^7 \cdot \frac{0.8^3}{12 \cdot 0.85} = 150.588 \cdot 10^4 \text{ kN/m}.$

Loads and impacts. The loads acting on the pile wall of the enclosing structure were calculated based on design solutions and material consumption, including loads from the adjacent four-story brick building located 8.0 m from the designed building, and loads from the road located 9.0 m from the edge of the pit cliff. The loads from the road were calculated in accordance with GOST R 52748–2007 (Fig. 5).

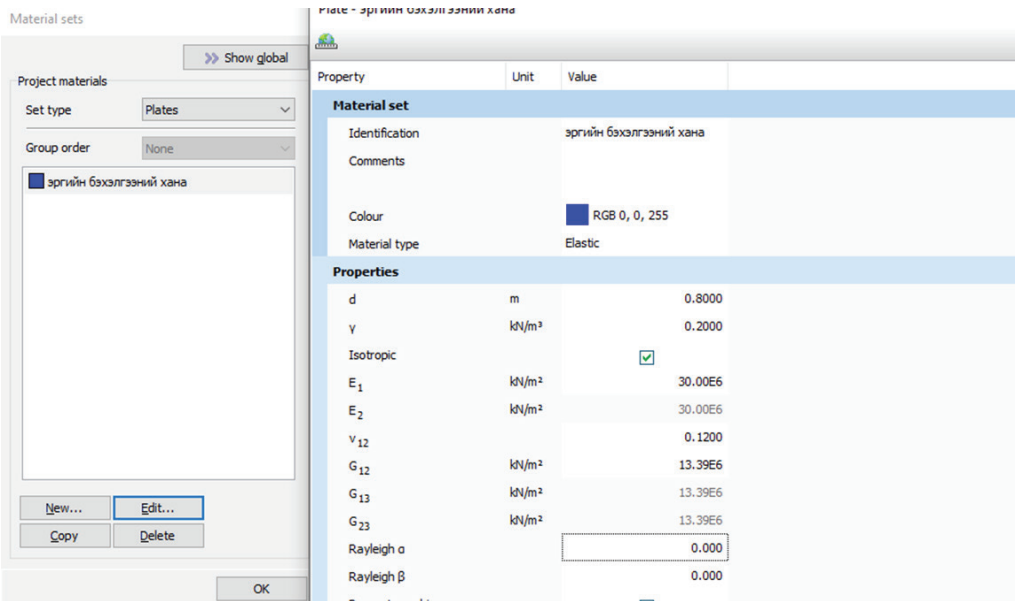


Fig. 4. Calculated pile data

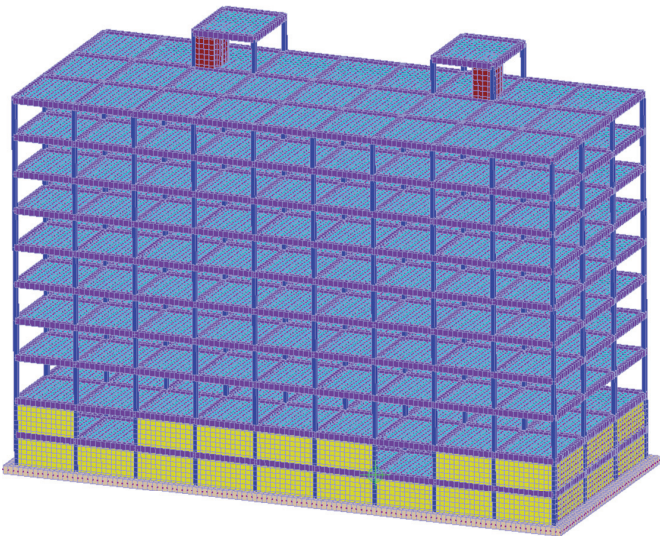


Fig. 5. Calculation model of the designed building

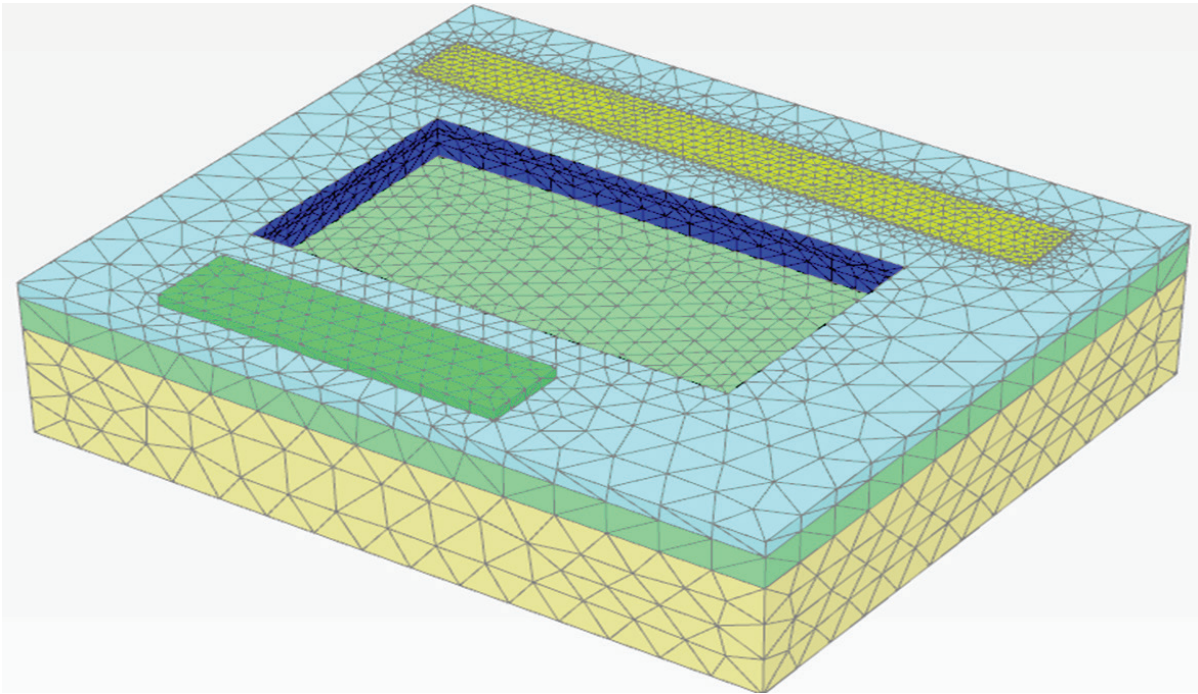


Fig. 6. Modelling of the enclosing structure

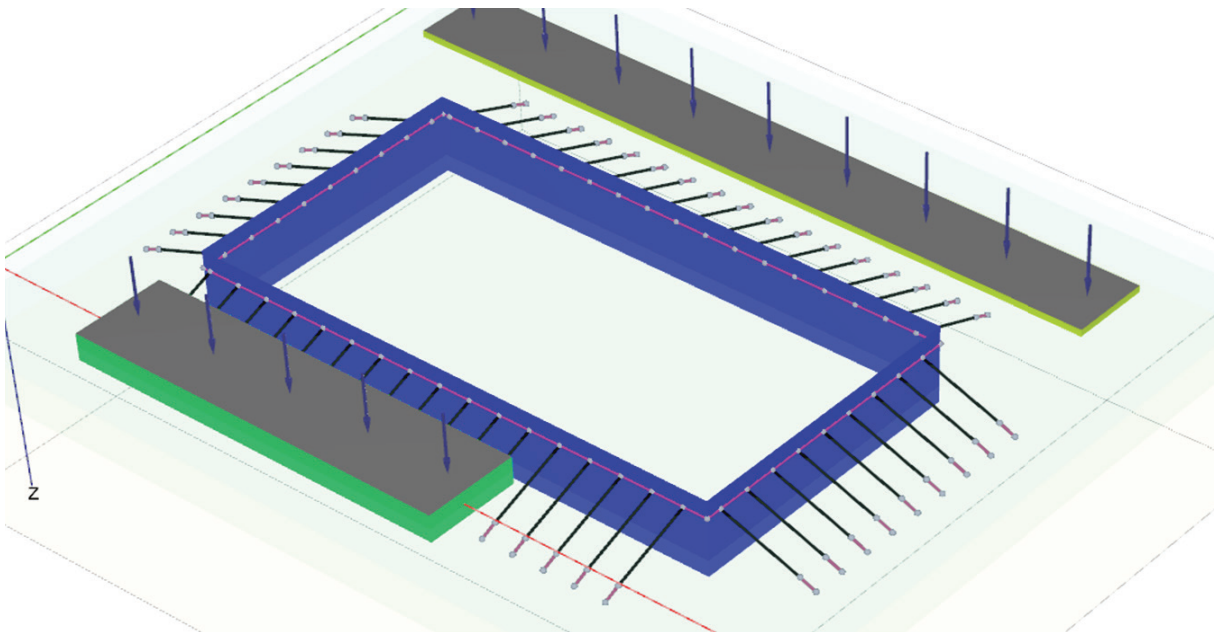


Fig. 7. Calculation model of anchor fastening of enclosing structure

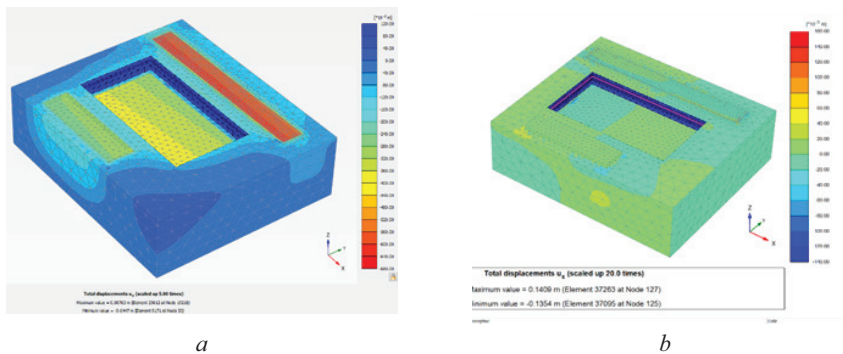


Fig. 8. Vertical deformation of the foundation soil

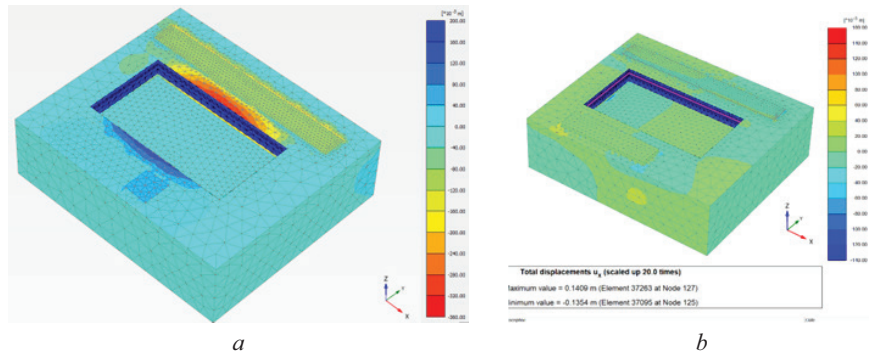


Fig. 9. Horizontal soil movements: *a* — in the *Y* direction; *b* — in the *X* direction

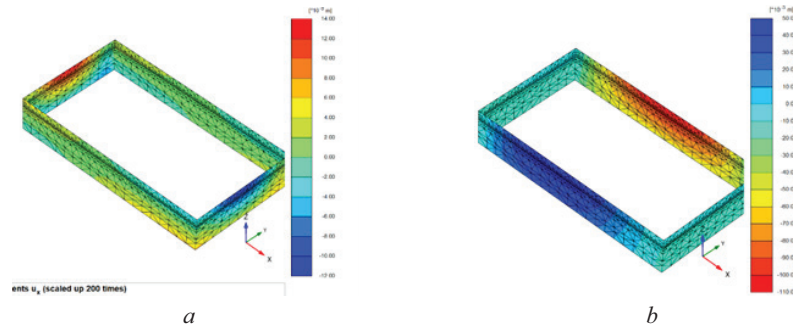


Fig. 10. Horizontal displacements of the structure in the *Y* and *X* directions

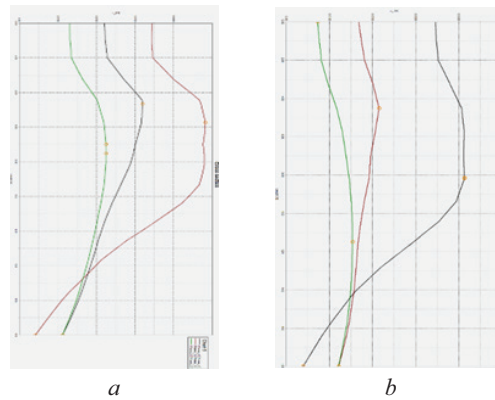


Fig. 11. Graph of horizontal deformations of the enclosing structure in the *Y* and *X* directions

Calculation model. The numerical calculation of the enclosing structure was modeled on the PALAXIS 3D programme using the finite element method (Fig. 6), taking into account the load from the building and the road located in the zone of influence of the new building (Fig. 7).

Horizontal and vertical displacements, as well as deformations from bending moments of enclosing structure, caused by loads from horizontal pressures of excavation pit soils and also from the adjacent building and road after excavation of excavation pit and construction of enclosing structure of excavation pit, are shown in Fig. 8–11.

Maximum settlement caused by the adjacent building $S = 2.9$ cm, relative deformation value $\Delta S = 0.003$.

The maximum value of horizontal displacement in the *Y* direction is $\Delta y = 9$ cm and is greater than the permissible value, based on this, there is a need to design an enclosing structure.

The horizontal displacement of the pile enclosing structure is: $\Delta X_{\max} = 1.0$ cm; $\Delta Y_{\max} = 1.7$ cm

The strength calculations of the enclosing structure are carried out depending on the magnitude of the bending moment. Fig. 12, *a* shows the values of the bending moments, and Fig. 12, *b* shows the maximum value of the bending moment $M_{\max} = 509.3$ kNm. $M_{\max}$ is the support moment, based on this condition, the strength calculations are carried out based on the values of the non-support moment.

Calculated value of bending moment $M_{\max} = 250$ kNm. In this case, when calculating the strength of a mono-

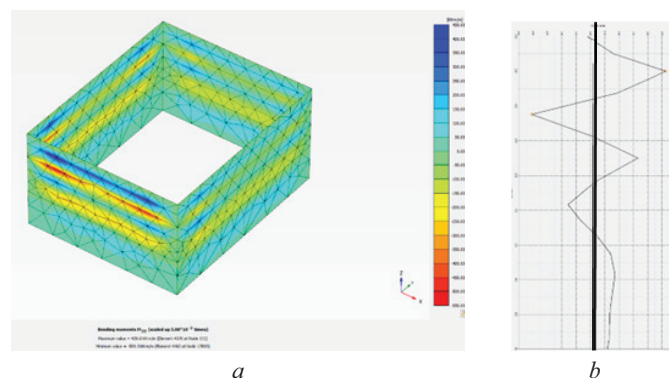


Fig. 12. Moment diagram arising in enclosing structures

lithic reinforced concrete pile in the tension zone, the obtained value of the cross-sectional area of the working reinforcement $A_s = 19.078 \text{ cm}^2$ was obtained, therefore 8D18 with an area $A_s = 20.36 \text{ cm}^2$ was selected, and for the full cross-section of the pile, working reinforcement 16D18A400 was selected.

CONCLUSIONS

The pile-enclosing structure of a deep pit is designed from monolithic reinforced concrete piles with a diameter of 700 mm and a length of 15.0 m, the anchor traction structure of the wall is carried out at a distance below 2.6 m from the pile head. The calculation results confirmed that the horizontal displacement of the enclosing structure of a deep pit will not exceed the maximum permissible value under the action

of the load from the building and the road located in the influence zone.

The calculation results confirmed that, provided that the enclosing structure of the pit wall of a newly constructed building is designed and implemented with the established dimensions in the calculation results, then horizontal displacements and additional settlements for a building located at a distance of 8.0 m from the upper cliff of the pit will not occur in excess of the permissible value.

Depending on the regional characteristics of Mongolia, it is necessary to take into account the influence of horizontal and tangential forces from possible soil freezing under conditions of seasonal deep freezing during construction work and develop a calculation method.

REFERENCES

1. Dalerici G., Del Grosso A. Nonlinear Finite Element Analysis of Piles in Cohesionless Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering: X International Conference*. 1981; 2:681-684.
2. Fadeev A.B. *Finite Element Method in Geomechanics*. Moscow, Nedra, 1987; 221. (rus.).
3. Zdravkovic L., Potts D.M., St John H.D. Modeling of a 3D excavation in finite element analysis. *Geotechnique*. 2005; 55(7):497-513. DOI: 10.1680/geot.2005.55.7.497
4. Bezgodov M., Kaloshina S. Selecting soil model for numerical modelling of the influence of deep excavation on the existing building. *Bulletin of PNIPU. Urban Studies*. 2012; 2(6):17-27. EDN OZOMSL. (rus.).
5. Carter J.P., Desai C.S., Potts D.M., Schweiger H.M., Sloan S.W. *Computing and computer Modeling in Geotechnical Engineering. 2000 ISRM International Symposium*. 2000.
6. Kung G.T.C., Ou C.Y., Juang C.H. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations. *Computers and Geotechnics*. 2009; 36(1-2):304-319. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.01.007
7. Golubev A.I., Seletsky A.V. On the issue of choosing a soil model for geotechnical calculations. *Actual Scientific and Technical Problems of Modern Geotechnics*. 2009; 9:6. (rus.).
8. Hsieh P.G., Ou C.Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*. 1998; 35(6):1004-1017. DOI: 10.1139/t98-056
9. Il'ichev V. A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. Prediction of deformations of buildings situated near pits opened in cramped urban settings within Moscow. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2004; 4:17-21. EDN SWFVBH. (rus.).
10. Moormann C., Moormann H.R. A Study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2002.
11. Razvodovsky D.E., Shulyatyev O.A., Nikiforova N.S. Assessment of the impact of new construction and measures to protect existing buildings and structures. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia*. 2008; 12:230-239. EDN WGRRUH. (rus.).

12. Telichenko V.I., Ter-Martirosyan Z.G. Interaction between long piles and the soil body exposed to non-linear deformations. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 4:22-27. EDN PABGJN. (rus.).
13. Son M., Cording E.J. Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2007; 133(8): 995-1002. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)-133: 8(995)
14. Konyukhov D.S., Lamonina E.V. Open-pit construction of underground structures under unfavorable geological processes in Moscow. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. Special issue. 2009; 1:500-502. (rus.).
15. Znamensky V.V., Chunyuk D.Yu., Morozov E.B. Construction of enclosing systems for excavations in cramped urban conditions. *Housing Construction*. 2012; 9:60-62. EDN NSDYTB. (rus.).
16. Setev N., Dalain D., Mangushev R. The work of bored piles on a horizontal load in soaked subsidence soils. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022.
17. Leushin V.Yu., Shishkin V.Ya., Karabaev M.I., Konyukhov D.S., Shmykov V.E. Analysis of deformations in the surrounding buildings during the construction of deep pits. *BST "Affordable and comfortable housing"*. 2011; 3:57-63. (rus.).
18. Mangushev R.A., Dyakonov I.P., Polunin V.M. *Numerical calculations in geotechnical practice. (Experience in using the finite element software package "PLAKSIS")*. Moscow, ASV Publishing House, 2023. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

BIONOTES: **Batsaikhan Anand** — consulting engineer, postgraduate student; **Mongolian University of Science and Technology**; build. 8, office 3068, 34 Ard Ayusha avenue, Ulaanbaatar, Mongolia; batsaikhan.a@soiltrade.mn;

Nyamdorj Setev — Doctor of Science, Professor, Department of Building Structures, Institute of Civil Engineering and Architecture; **Mongolian University of Science and Technology**; build. 8, office 3068, 34 Ard Ayusha avenue, Ulaanbaatar, Mongolia; nmdrj.s@gmail.com;

Dashjamts Dalai — Doctor of Science, Professor, Department of Construction Production, Institute of Civil Engineering and Architecture; **Mongolian University of Science and Technology**; build. 8, office 3068, 34 Ard Ayusha avenue, Ulaanbaatar, Mongolia; d.dashjamts@must.edu.mn;

Adyajav Ganbold — Doctor, senior lecturer, Department of Construction Production, Institute of Civil Engineering and Architecture; **Mongolian University of Science and Technology**; build. 8, office 3068, 34 Ard Ayusha avenue, Ulaanbaatar, Mongolia; adiyajav1020@mail.ru.

Authors' contributions:

Batsaikhan Anand — research concept, specimen preparation, testing, numerical modeling, results processing, writing the original text, drawing the conclusion.

Nyamdorj Setev — scientific supervision, research concept, scientific consulting, text revision, final conclusions.

Dashjamts Dalai — study concept, testing, results processing, original text writing, conclusion drafting.

Adyajav Ganbold — testing, numerical modeling, results processing, conclusion drafting.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dalerici G., Del Grosso A. Nonlinear Finite Element Analysis of Piles in Cohesionless Soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering: X International Conference*. 1981. Vol. 2. Pp. 681–684.
2. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.
3. Zdravkovic L., Potts D.M., St John H.D. Modeling of a 3D excavation in finite element analysis // *Geotechnique*. 2005. Vol. 55. Issue 7. Pp. 497–513. DOI: 10.1680/geot.2005.55.7.497
4. Безгодов М.А., Калошина С.В. Выбор модели грунта при численном моделировании влияния разработки глубоких котлованов на существующую застройку // *Вестник ПНИПУ. Урбанистика*. 2012. № 2 (6). С. 17–27. EDN OZOMSL.
5. Carter J.P., Desai C.S., Potts D.M., Schweiger H.M., Sloan S.W. Computing and computer Modeling in Geotechnical Engineering // *2000 ISRM International Symposium*. 2000.
6. Kung G.T.C., Ou C.Y., Juang C.H. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations // *Computers and Geotechnics*. 2009. Vol. 36. Issue 1–2. Pp. 304–319. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.01.007
7. Голубев А.И., Селецкий А.В. К вопросу о выборе модели грунта для геотехнических расчетов //

Актуальные научно-технические проблемы современной геотехники. 2009. Т. 9. С. 6.

8. Hsieh P.G., Ou C.Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation // Canadian Geotechnical Journal. 1998. Vol. 35. Issue 6. Pp. 1004–1017. DOI: 10.1139/t98-056

9. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях тесной городской застройки Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2004. № 4. С. 17–21. EDN SWFVBH.

10. Moormann C., Moormann H.R. A Study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2002.

11. Разводовский Д.Е., Шулятьев О.А., Никифорова Н.С. Оценка влияния нового строительства и мероприятий по защите существующих зданий и сооружений // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. 2008. Т. 12. С. 230–239. EDN WGRRUH.

12. Теличенко В.И., Тер-Мартirosян З.Г. Взаимодействие сваи большой длины с нелинейно-деформируемым массивом грунта // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 22–27. EDN PABGJN.

13. Son M., Cording E.J. Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-

induced ground movements // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007. Vol. 133. Issue 8. Pp. 995–1002. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)-133:8(995)

14. Конюхов Д.С., Ламонина Е.В. Строительство подземных сооружений открытым способом в условиях неблагоприятных геологических процессов в г. Москве // Вестник МГСУ. 2009. Специальный выпуск. № 1. С. 500–502.

15. 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.

16. Setev N., Dalain D., Mangushev R. The work of bored piles on a horizontal load in soaked subsidence soils // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022.

17. Леушин В.Ю., Шишкин В.Я., Карабаев М.И., Конюхов Д.С., Шмыков В.Е. Анализ деформаций в окружающей застройке при сооружении глубоких котлованов // БСТ «Доступное и комфортное жилье». 2011. № 3. С. 57–63.

18. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин В.М. Численные расчеты в геотехнической практике. (Опыт применения конечно-элементного программного комплекса «ПЛАКСИС»). М. : Издательство АСВ, 2023.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Батсайхан Ананд — инженер-консультант, аспирант; Монгольский университет науки и технологий; г. Улан-Батор, Монголия, пр-т Ард Аюша, д. 34, корп. № 8, офис 3068; batsaikhan.a@soiltrade.mn;

Нямдорж Сетев — доктор наук, профессор кафедры строительных конструкций Института гражданского строительства и архитектуры; Монгольский университет науки и технологий; г. Улан-Батор, Монголия, пр-т Ард Аюша, д. 34, корп. № 8, офис 3068; nmdrj.s@gmail.com;

Дашиджац Далай — доктор наук, профессор кафедры строительного производства Института гражданского строительства и архитектуры; Монгольский университет науки и технологий; г. Улан-Батор, Монголия, пр-т Ард Аюша, д. 34, корп. № 8, офис 3068; d.dashjamts@must.edu.mn;

Адьяджав Ганболд — доктор медицинских наук, старший преподаватель кафедры строительного производства Института гражданского строительства и архитектуры; Монгольский университет науки и технологий; г. Улан-Батор, Монголия, пр-т Ард Аюша, д. 34, корп. № 8, офис 3068; adiyajav1020@mail.ru.

Вклад авторов:

Батсайхан Ананд — концепция исследования, подготовка образцов, тестирование, численное моделирование, обработка результатов, написание оригинального текста, составление заключения.

Нямдорж Сетев — научное руководство, концепция исследования, научное консультирование, редактирование текста, окончательные выводы.

Дашиджац Далай — концепция исследования, тестирование, обработка результатов, написание оригинального текста, составление заключения.

Адьяджав Ганболд — тестирование, численное моделирование, обработка результатов, составление заключения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.2

Численное моделирование процесса формоизменения регулярно-стержневой гексагональной решетки при дискретном кинематическом воздействии

Петр Павлович Гайджуров¹, Надежда Геннадьевна Царитова²,
Никита Аркадьевич Корчагин²

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова;
г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема исследования процесса трансформации регулярной стержневой системы из исходного плоского состояния в арочную форму при управляемом кинематическом воздействии базируется на решении геометрически нелинейной задачи строительной механики. В литературе практически отсутствуют сведения о математическом моделировании трансформируемых шарнирно-стержневых систем с учетом формоизменения, в связи с этим актуально направление, связанное с разработкой инженерной методики, расчета геометрически изменяемых конструкций с применением метода конечных элементов.

Материалы и методы. Представлены методика конечно-элементного моделирования формоизменения регулярной гексагональной стержневой решетки с использованием упругих шарниров в узловых соединениях балочных элементов и применение процедуры инкрементального кинематического воздействия на контурные узлы. Рассмотрены две модели узловых соединений: обычная (связывающая перемещения и углы поворота узлов элементов решетки с соответствующими узлами площадок соединений) и с упругими шарнирами.

Результаты. Особенность предлагаемой модели узловых соединений балочных конечных элементов заключается в введении шести комбинированных элементов с различными значениями коэффициентов линейных и поворотных жесткостей. Приводятся сравнительные результаты вычислительных экспериментов для моделей решеток с упругими шарнирами и без упругих шарниров; результаты моделирования в виде графиков зависимости «стрелы» подъема от числа шагов трансформации для различных значений жесткостей поворотных пружин.

Выводы. Предлагаемый прямой инкрементальный алгоритм решения геометрически нелинейной задачи является абсолютно сходящимся. На основании результатов моделирования процесса формоизменения гексагональной решетки может быть спроектирована конструкция шарнирно-стержневого соединения. Рассмотренная трансформация гексагональной решетки представляет определенный интерес как 3D-арт-проект в области архитектуры и дизайна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гексагональные решетки, метод конечных элементов, узловые соединения, геометрическая нелинейность, прямой инкрементальный метод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гайджуров П.П., Царитова Н.Г., Корчагин Н.А. Численное моделирование процесса формоизменения регулярно-стержневой гексагональной решетки при дискретном кинематическом воздействии // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.2

Автор, ответственный за переписку: Надежда Геннадьевна Царитова, ncaritova@yandex.ru.

Numerical simulation of the shaping process of a regular-rod hexagonal lattice under discrete kinematic action

Peter P. Gaydzhurov¹, Nadezhda G. Tsaritova², Nikita A. Korchagin²

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of studying the process of transformation of a regular rod system from an initial flat state to an arched shape under controlled kinematic action is based on solving a geometrically nonlinear problem of structural mechanics. There is practically no information in the literature on the mathematical modelling of transformable hinge-rod systems, taking into account the shape change, in this regard, the relevant direction is related to the development of engineering techniques for calculating geometrically variable structures using the finite element method.

Materials and methods. This paper presents a technique for finite element modelling of the shape of a regular hexagonal rod lattice using elastic hinges in the nodal joints of beam elements and applying the procedure of incremental kinematic

action on contour nodes. Two models of nodal joints are considered: conventional (connecting the displacements and angles of rotation of the nodes of the lattice elements with the corresponding nodes of the joint pads) and with elastic hinges.

Results. A feature of the proposed model of nodal joints of beam end elements is the introduction of six combined elements with different values of linear and rotational stiffness coefficients. Comparative results of computational experiments for lattice models with elastic hinges and without elastic hinges are presented. The simulation results are presented in the form of graphs of the dependence of the “boom” of lifting on the number of transformation steps for various stiffness values of rotary springs.

Conclusions. The proposed direct incremental algorithm for solving a geometrically nonlinear problem is absolutely convergent. Based on the simulation results of the hexagonal lattice shaping process, the hinge-rod joint structure can be designed. The considered transformation of the hexagonal lattice is of particular interest as a 3D art project in the field of architecture and design.

KEYWORDS: hexagonal lattices, finite element method, nodal connections, geometric nonlinearity, direct incremental method

FOR CITATION: Gaydzhurov P.P., Tsaritova N.G., Korchagin N.A. Numerical simulation of the shaping process of a regular-rod hexagonal lattice under discrete kinematic action. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.2

Corresponding author: Nadezhda G. Tsaritova, ncaritova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из креативных направлений в современной архитектуре является так называемый кинетический дизайн, основанный на управляемом изменении геометрии конструкции с целью получения требуемых объемно-планировочных решений [1, 2]. К этому стоит добавить формоизменение конструктивных элементов фасадов зданий по схеме оригами. Идея создания подобных строительных сооружений во многом переплетается с техническими решениями в области кинематически изменяемых аэрокосмических систем типа раскрываемых панелей солнечных батарей и крыльев с изменяемой геометрией [3–7]. Также в трансформируемых механических системах важен симбиоз робототехники и биомеханики для проектирования роботов-андроидов [8]. Как правило, исполнительные механизмы современных промышленных роботов совершают большие перемещения в трехмерном пространстве. Следовательно, система дифференциальных уравнений кинестатики, описывающая рабочий цикл робототехнической системы, будет нелинейной. Кроме этого, узловые соединения таких механизмов выполняются в виде шарниров с обратными связями, что существенно усложняет процесс компьютерного моделирования.

Необходимо отметить, что в литературе по строительной механике практически отсутствуют сведения о математическом моделировании трансформируемых шарнирно-стержневых систем с учетом формоизменения. В этой связи актуально направление, связанное с разработкой инженерной методики, расчета геометрически изменяемых конструкций с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [9, 10]. Конечно-элементное моделирование стержневых конструкций базируется на применении матрицы жесткости балочного конечного элемента (КЭ) с шестью степенями свободы в узле [11–13]. В рамках линейного анализа перемещения и углы поворота балочного КЭ считаются малыми. Однако известно, что для гибких стержневых систем характерны боль-

шие линейные и угловые перемещения при малых деформациях [14, 15]. В этом случае численное решение геометрически нелинейной задачи строится на базе итерационной процедуры Ньютона – Рафсона и метода «корректирующих дуг», суть которого состоит в адаптивной корректировке величины шага нагружения при приближении и после прохождения точки бифуркации [16, 17].

Упрощенный метод расчета гибких упругих стержней основан на представлении стержня набором прямолинейных балочных КЭ одинаковой длины, соединенных в зонах сопряжения пружинами [3]. Пример балочно-пружинной схемы консольного стержня показан на рис. 1.

Полагается, что между узловым моментом и соответствующим углом поворота существует линейная зависимость:

$$M_i = k\alpha_i; i = 1, 2, 3,$$

где k — коэффициент пропорциональности, характеризующий в данном случае упругую жесткость шарнира. В работе [3] для расчета гибких стержней в двумерной постановке использован следующий функционал:

$$\Theta = \int_0^l \frac{1}{2} \frac{M^2}{EJ} dx - \sum_i (M_i \alpha_i)_{x=x_i} + \Pi,$$

где M — изгибающий момент на свободном конце стержня; EJ — изгибная жесткость стержня; M_i ,

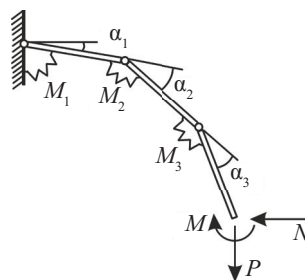


Рис. 1. Балочно-пружинная схема гибкого стержня (рисунок авторов)

α_i — реактивные моменты в пружинах сопряжения и углы поворотов балочных КЭ; Π — работа внешних сил.

При этом считается, что упругая жесткость пружин эквивалентна изгибной жесткости стержня. Представленная концепция деформационного моделирования узкоспециализирована и не может быть напрямую распространена на задачи строительной механики, связанные с исследованием пространственных кинематически трансформируемых стержневых систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конечно-элементное моделирование процесса трансформации регулярной стержневой гексагональной решетки при шаговом смещении контурных узлов в направлении глобальных осей X и Y выполнили в среде программного комплекса ANSYS Mechanical [18–20]. Для написания макросов использовали встроенный в ANSYS язык программирования APDL. Каждый стержень решетки и площадки узлового соединения представили в виде одного балочного КЭ.

Рассмотрим две модели узловых соединений:

- обычную, связывающую перемещения и углы поворота узлов элементов решетки с соответствующими узлами площадок соединений;
- с упругими шарнирами, расположенными между узлами элементов решетки и узлами площадок соединений.

Процесс трансформации формы каждого стержня из исходного состояния в конечное представим в виде последовательности шагов. На каждом шаге сначала удаляем предыдущую конечно-элементную

сетку, а затем по откорректированным с учетом полученных перемещений координатам узлов строим новую сетку. При этом топологическая информация о конечно-элементной модели решетки полностью сохраняется. На рис. 2. приведена схема корректировки координат узлов КЭ на k -м шаге кинематической трансформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для демонстрации предлагаемой концепции деформационного формоизменения выполним конечно-элементное моделирование процесса трансформации регулярной стержневой системы из исходного плоского состояния в арочную форму при дискретном кинематическом воздействии. Схема рассматриваемой гексагональной регулярно-стержневой решетки в исходном (начальном) положении показана на рис. 3.

На рис. 3 контрольные значения размеров ячейки решетки в начальном состоянии $s_{a,b} = 0,966$ м, $s_c = 1,058$ м; цифрами 1–3 обозначены стержни, для которых вычисляются углы ориентации $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ в процессе формоизменения решетки.

Модель повторяющегося узлового соединения, позволяющая моделировать формоизменение решетки, представлена на рис. 4. Данная модель включает платформу t , образованную из трех недеформируемых стержневых элементов. В каждой вершине равностороннего треугольника t между парными узлами i, j расположены упругие шарниры.

Как показано на рис. 4, каждый упругий шарнир включает три линейных и три поворотных пружины. Для обозначения элементов упругого шар-

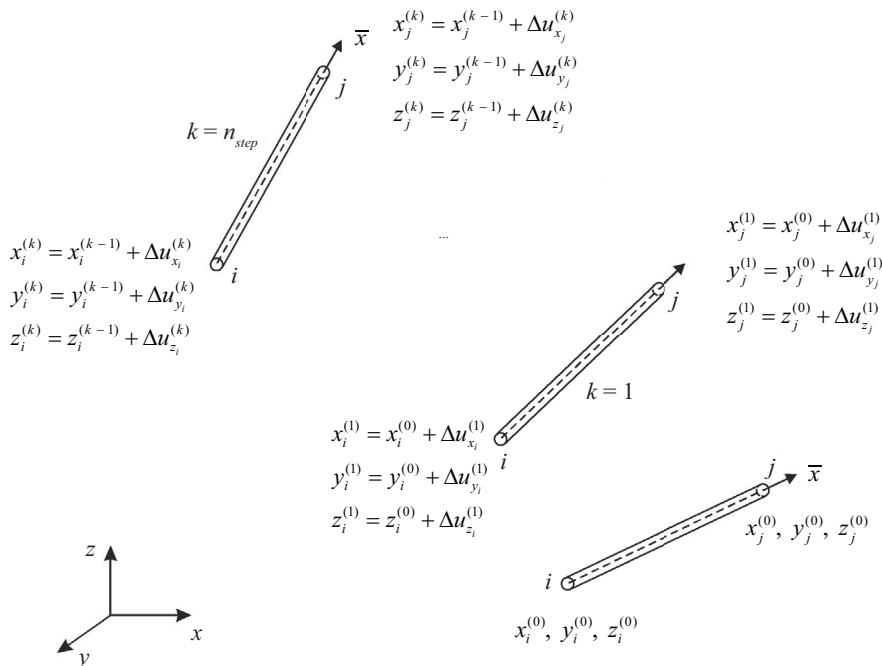


Рис. 2. Схема трансформации геометрии балочного КЭ (n_{step} — число шагов нагружения) (рисунок авторов)

нира приняты следующие символы: k_x, k_y, k_z — коэффициенты жесткостей линейных пружин (Н/м), ориентированных вдоль осей X, Y, Z ; $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ — соответствующие жесткости поворотных пружин (Н·м/рад). Каждый стержень решетки моделируем одним балочным КЭ.

На рис. 5 приведена расчетная схема решетки, соответствующая синхронному симметричному кинематическому воздействию на узлы с координатами $x = 0$ и $x = 9,76$ м. Назначаем следующие параметры для процесса трансформации: стартовое значение «стрелы» подъема решетки $f_s = 0,01$ м; значение шага приращения $\Delta_x = 0,01$ м; число шагов $n_{step} = 200$. Во всех расчетах вводим учет собственного веса конструкции. Отметим, что «стартовое» положение решетки при заданных статических граничных условиях совпадает с первой собственной формой.

Механические константы стержней решетки (алюминиевый сплав): модуль упругости $E = 6,8 \times 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$; плотность $\rho = 2885$ кг/м³. Модуль упругости практически недеформируемых стержней платформы $E_t = 10^9$ МПа. Стержни решетки (длина 0,4423 м) и узловых платформ (длина 0,1 м) имеют трубчатую форму поперечного сечения с наружным диаметром 0,018 м. Толщина стенки трубы 0,0015 м. Значения коэффициентов жесткости k_x, k_y, k_z принимаем численно равными величине E .

Результаты моделирования в виде графиков зависимости «стрелы» подъема f_s от числа шагов трансформации i для различных значений жестко-

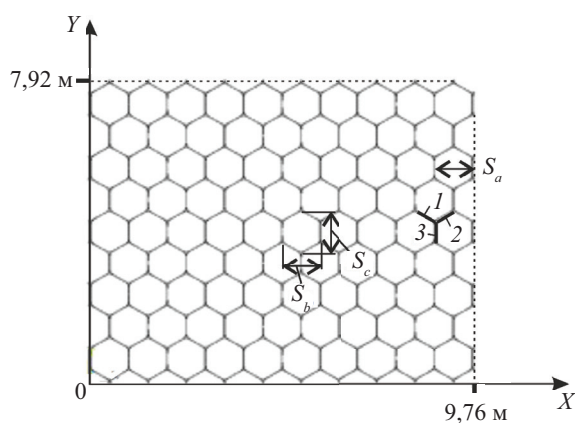


Рис. 3. Схема гексагональной решетки в исходном положении (рисунок авторов)

стей поворотных пружин представлены на рис. 6. На рис. 6 линиям 1–4 соответствуют значения $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$: 1000, 3000, 5000, 10 000 (Н·м/рад). График, выполненный штриховой линией, соответствует варианту решетки без упругих шарниров. Из приведенных графиков следует вывод о нелинейной зависимости значения f_s от величины кинематического воздействия на узлы решетки с координатами $x = 0$ и $x = 9,76$ м. Конечный арочный вид решетки при $n_{step} = 200$ для $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ 1000 Н·м/рад и 10 000 Н·м/рад показан на рис. 7.

Графики изменений размеров ячеек в зависимости от шага трансформации приведены на рис. 8.

Для сравнения на рис. 9 показана графическая зависимость $s_{a,b} \sim i$ для решетки без упругих шар-

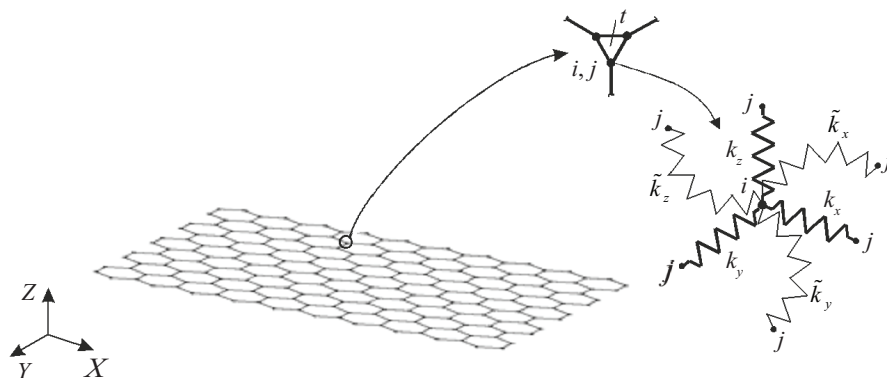


Рис. 4. Схема узлового соединения стержней решетки (рисунок авторов)

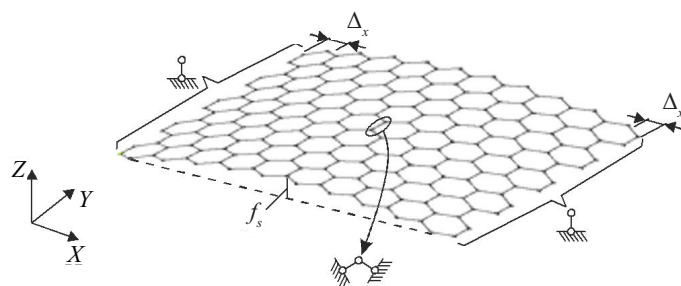


Рис. 5. Расчетная схема, соответствующая симметричному кинематическому воздействию Δ_x (рисунок авторов)

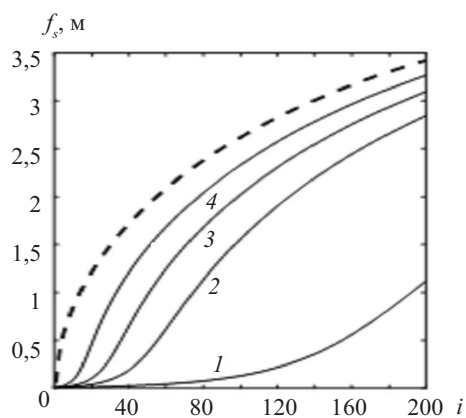
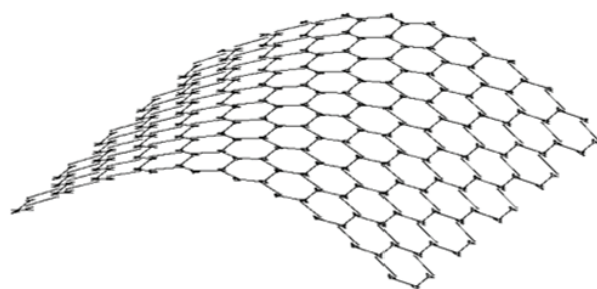
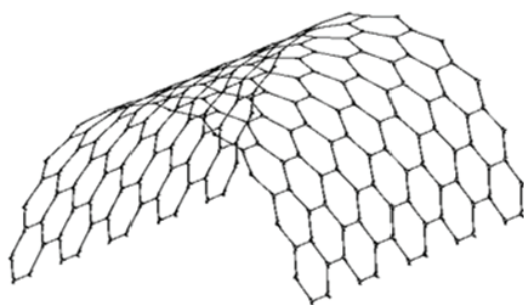


Рис. 6. Графики $f_s \sim i$ (рисунок авторов)



a



b

Рис. 7. Арочный вид решетки: a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000$ Н·м/рад (рисунок авторов)

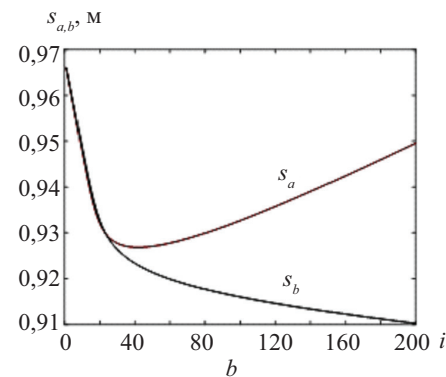
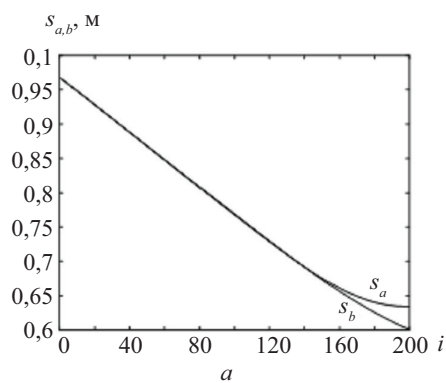


Рис. 8. Графики $s_{a,b} \sim i$: a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000$ Н·м/рад

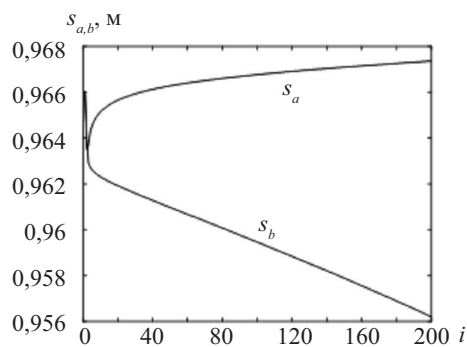


Рис. 9. Графики $s_{a,b} \sim i$ для решетки без упругих шарниров

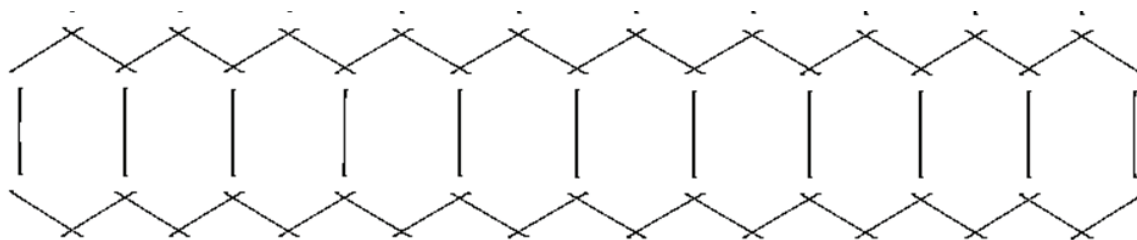


Рис. 10. Фрагмент арочной решетки ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад)

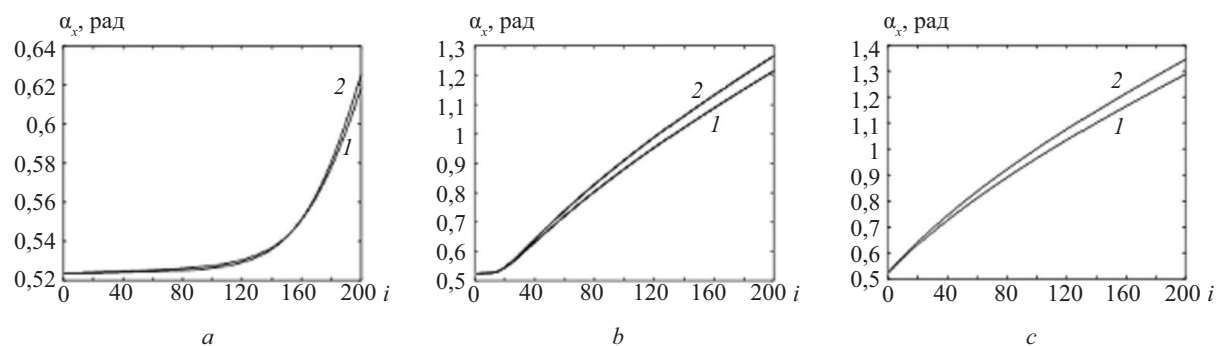


Рис. 11. Графики $\alpha_x \sim i$: a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000$ Н·м/рад; c — без упругих шарниров

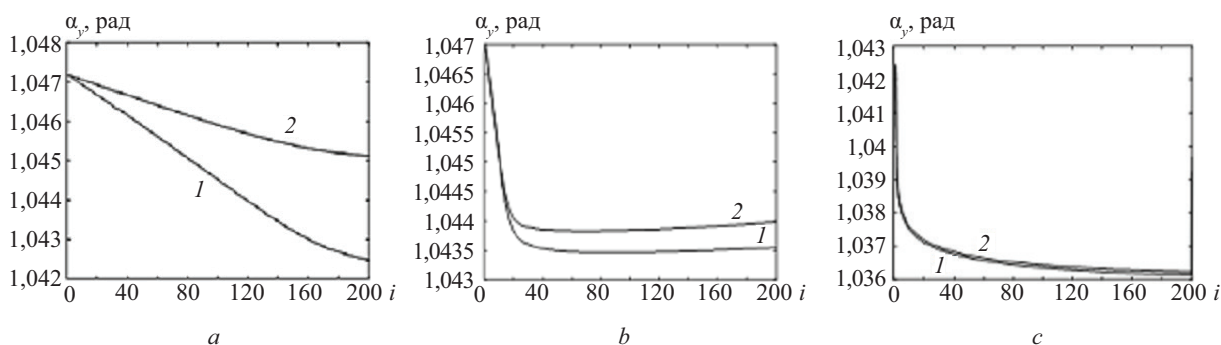


Рис. 12. Графики $\alpha_y \sim i$: a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000$ Н·м/рад; c — без упругих шарниров

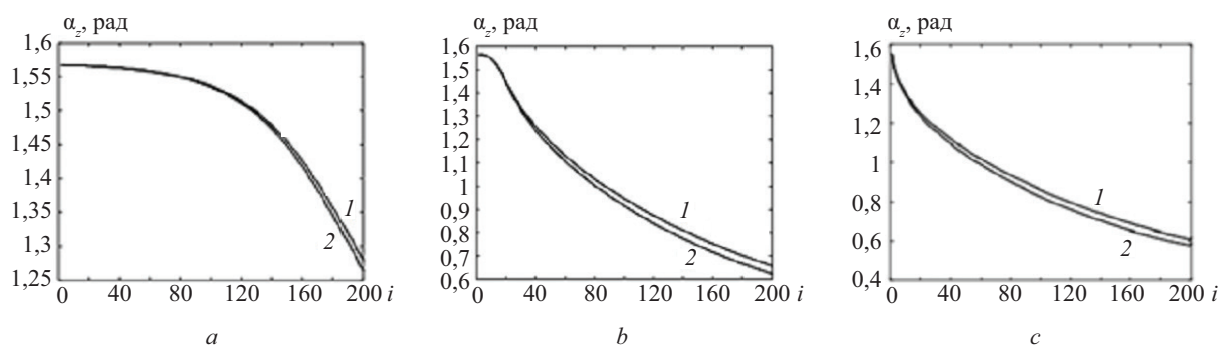


Рис. 13. Графики $\alpha_z \sim i$: a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000$ Н·м/рад; c — без упругих шарниров

ниров. Из приведенных графиков видно, что максимальное изменение размера ячейки s_b составляет 0,4 м на рис. 6, a ; 0,056 м на рис. 6, b и 0,01 м на рис. 9. Размер s_a изменяется соответственно на 0,016 и 0,0014 м. Причем в обоих случаях характер графиков $s_a \sim i$ качественно совпадает, т.е. в начале трансформации отмечается резкое уменьшение, а затем пологий рост. Как и следовало ожидать, решетка с $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000$ Н·м/рад является наиболее «гуттаперчевой» при заданном виде кинематического воздействия. На рис. 10 представлена визуализация фрагмента данной решетки при $n_{step} =$

$= 200$ (показано положение стержневых элементов, примыкающих к опорным узлам).

Следует отметить, что для разработки конструкции узлового соединения гексагональной решетки необходимо иметь данные об изменении ориентации стержней в процессе трансформации. С этой целью было выполнено исследование зависимости углов поворота α_x , α_y , α_z стержней 1, 2 (рис. 11) от шага трансформации i . Графики $\alpha_x \sim i$, $\alpha_y \sim i$, $\alpha_z \sim i$ для решеток с упругими шарнирами при значениях параметров $\tilde{k}_x$, $\tilde{k}_y$, $\tilde{k}_z$ 1000 Н·м/рад, 10 000 Н·м/рад, а также решеток без упругих шарниров приведены на рис. 11–13.

Результаты модального анализа

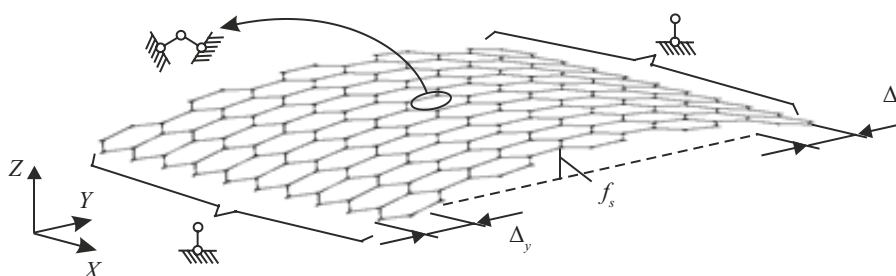
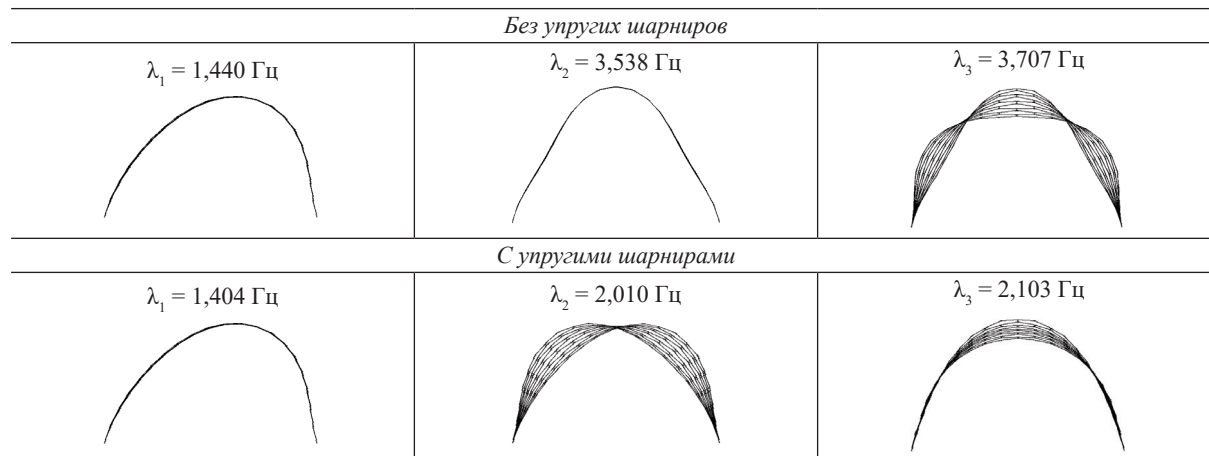


Рис. 14. Расчетная схема, соответствующая симметричному кинематическому воздействию Δ_y

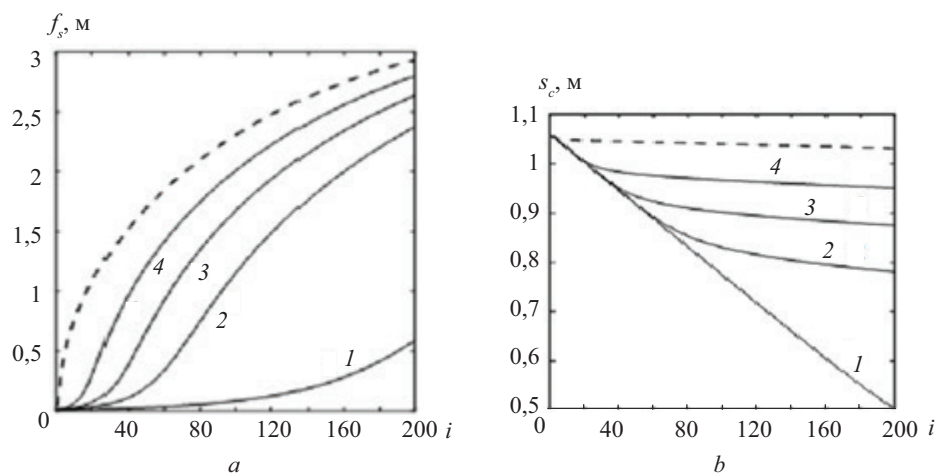


Рис. 15. Графики: а — $f_s \sim i$; б — $s_c \sim i$

Из представленных графиков видно, что наиболее интенсивно при трансформации происходит изменение углов α_x (рис. 11) и α_z (рис. 13).

Максимальное увеличение угла α_x для стержня 2 (рис. 1) составляет: $5,7^\circ$ (рис. 11, а); 43° (рис. 11, б); $51,6^\circ$ (рис. 11, с). При этом угол α_z уменьшается: $17,6^\circ$ (рис. 13, а); $55,6^\circ$ (рис. 13, б); $57,3^\circ$ (рис. 13, с). Кривые на приведенных рисунках практически совпадают, что говорит о синхронности поворотов стержней 1 и 2. Подчеркнем, что изменения углов α_x и α_z характеризуют поворот стержня 2 относительно осей X и Z соответственно. Угол α_y в процессе трансфор-

мации изменяется незначительно, максимум на $0,4^\circ$ (рис. 12, с).

В таблице представлены результаты модального анализа (первые три собственных пары) для вариантов арки без упругих шарниров и с упругими шарнирами, в которых $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$. Как видно из таблицы, первые собственные частоты для рассматриваемых вариантов арки практически совпадают. Вместе с тем вторые и третьи собственные пары различаются количественно и качественно. Это объясняется наличием упругих шарниров, которые снижают жесткость конструкции и тем са-

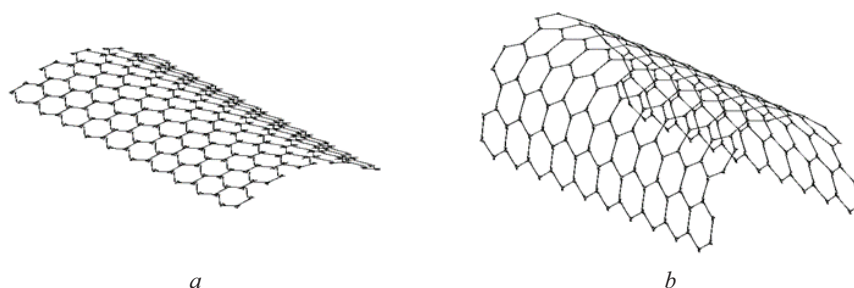


Рис. 16. Арочный вид решетки: *a* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$; *b* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$

мым уменьшают соответствующие собственные частоты.

В качестве альтернативного способа трансформации решетки рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 14. В данном случае шаг перемещения задается вдоль оси Y . Принимаем шаг $\Delta_y = 0,01 \text{ м}$ и число шагов $n_{\text{step}} = 200$.

Результаты моделирования процесса трансформации решетки по альтернативной схеме в виде графиков зависимости «стрелы» подъема арки f_s и изменения размера ячейки s_c от шага перемещения i представлены на рис. 15.

Как видно из рис. 15, *b* графики $s_c \sim i$ при значениях $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$, равных 3000, 5000 и 10 000, нелинейны (линии 2, 3, 4). Вместе с тем при значениях жесткостей поворотных пружин 1000 Н·м/рад (линия 1) и для решетки без упругих шарниров (штриховая линия) характер зависимости $s_c \sim i$ линейный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Арочные формы решетки для параметров жесткости поворотных пружин 1000 и 10 000 Н·м/рад приведены на рис. 16.

Расчеты показали, что для данной расчетной схемы решетки (рис. 12) максимальный угол поворота стержней 1 и 2 при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10\,000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ не превышает $\alpha_{\text{max}} = 6^\circ$.

На основании выполненных вычислительных экспериментов установлено:

- предлагаемый прямой инкрементальный алгоритм решения геометрически нелинейной задачи является абсолютно сходящимся;
- разработанная методика назначения жесткостей поворотных пружин может быть использована при проектировании конкретной конструкции узлового соединения стержней регулярной решетки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семенов В.С., Акбаралиев Р. Трансформируемые конструкции покрытий в современной архитектуре // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2010. Т. 10. № 2. С. 25–31. EDN LMDBGV.
2. Лебедев Ю.С., Самохина Т.М. Трансформируемые конструкции в современной архитектуре. М. : ЦНТИ, 1983. 39 с.
3. Царитова Н.Г., Курбанов А.И., Курбанова А.А. Энергоэффективные здания на основе трансформируемых каркасов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 91–103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB.
4. De Temmerman N., Mira L.A., Vergauwen A. Hendrickx H., De Wilde W.P. Transformable structures in architectural engineering // WIT Transactions on The Built Environment. 2012. DOI: 10.2495/hpsm120411
5. Усуюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. М. : Машиностроение, 1988. 388 с.
6. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. М. : Факториал, 1997. 302 с.
7. Пхио А., Семенов В.Н., Федюлов Б.Н. Оптимизация трансформируемых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 32–40. EDN NXSDGS.
8. Sol E.J. Kinematics and dynamics of multibody system: a systematic approach to systems with arbitrary connections : Phd Thesis. Technische Hogeschool Eindhoven, 1983. DOI: 10.6100/IR82221
9. Гайджуrow П.П., Царитова Н.Г. Моделирование процесса направленной трансформации регулярных шарнирно-стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. № 1 (209). С. 5–11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11. EDN HAMXJU.
10. Gaydzhurov P., Tsaritova N. Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. Issue 3. Pp. 14–23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
11. Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Онищенко Е.В. Возможность использования метода конечных элементов в форме классического смешанного метода для геометрически нелинейного анализа шарнирно-стержневых систем.

невых систем // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 47–58. EDN VBTZQR.

12. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов : справочник / под общ. ред. В.И. Мяченкова. М. : Машиностроение, 1989. 520 с.

13. Секулович М. Метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1993. 664 с.

14. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М. : Наука, 1986. 296 с.

15. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. М. : Машиностроение, 1978. 222 с.

16. Battini J.M., Pacoste C. Co-rotational beam elements with warping effects in instability problems //

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2002. Vol. 191. Issue 17–18. Pp. 1755–1789. DOI: 10.1016/s0045-7825(01)00352-8

17. Kuo-Mo H., Horng-Jann H., Yeh-Ren C. A co-rotational procedure that handles large rotations of spatial beam structures // Computers & Structures. 1987. Vol. 27. Issue 6. Pp. 769–781. DOI: 10.1016/0045-7949(87)90290-2

18. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М. : ДМК Пресс, 2012. 248 с.

19. Морозов Е.М., Муїземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: механика разрушения. М. : URSS, 2008. 453 с. EDN QJTBZ.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Петр Павлович Гайджуров** — доктор технических наук, профессор кафедры технической механики; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; gpp-161@yandex.ru;

Надежда Геннадьевна Царитова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; ncaritova@yandex.ru;

Никита Аркадьевич Корчагин — аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; ncaritova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гайджуров П.П. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Царитова Н.Г. — научное руководство, редактирование статьи, итоговые выводы.

Корчагин Н.А. — сбор и обработка данных, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

One of the creative trends in modern architecture is kinetic design, which is based on controlled changes in the geometry of a structure to achieve the desired spatial and planning solutions [1, 2]. To this should be added the origami-inspired reshaping of structural elements of building facades. The idea of creating such structures is largely intertwined with technical solutions in the field of kinematically variable aerospace systems, such as deployable solar panels and wings with variable geometry [3–7]. In transformable mechanical systems, the symbiosis of robotics and biomechanics is also important for the design of android robots [8]. As a rule, the actuators of modern industrial robots perform large movements in three-dimensional space. Consequently, the system of differential equations of kinematics describing the working cycle of a robotic system will be nonlinear. In addition, the node connections of such mechanisms are made in the form of joints with feedback, which significantly complicates the process of computer modelling.

It should be noted that there is virtually no information in the literature on structural mechanics about

mathematical modelling of transformable hinged-rod systems taking into account shape change. In this regard, the development of engineering methods for calculating geometrically variable structures using the finite element method (FEM) [9, 10]. Finite element modelling of bar structures is based on the use of a beam finite element (FE) stiffness matrix with six degrees of freedom at the node [11–13]. Within the framework of linear analysis, the displacement and rotation angles of the beam FE are considered small. However, it is known that flexible bar systems are characterized by large linear and angular displacements at small deformations [14, 15]. In this case, the numerical solution of the geometrically nonlinear problem is based on the Newton – Raphson iterative procedure and the “corrective arcs” method, the essence of which is the adaptive correction of the load step size when approaching and after passing the bifurcation point [16, 17].

A simplified method for calculating flexible elastic rods is based on representing the rod as a set of straight beam elements of equal length connected by springs at the joints [3]. An example of a beam-spring model of a cantilever rod is shown in Fig. 1.

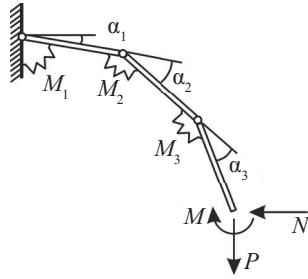


Fig. 1. Beam-spring diagram of a flexible rod (figure by the authors)

It is assumed that there is a linear relationship between the torque and the corresponding angle of rotation:

$$M_i = k\alpha_i; i = 1, 2, 3,$$

where k is the proportionality coefficient, which in this case characterizes the elastic stiffness of the hinge. In [3], the following functional was used to calculate flexible rods in a two-dimensional setting:

$$\Theta = \int_0^l \frac{1}{2} \frac{M^2}{EJ} dx - \sum_i (M_i \alpha_i)_{x=x_i} + \Pi,$$

where M is the bending moment at the free end of the rod; EJ is the bending rigidity of the rod; M_i , α_i are the reactive moments in the coupling springs and the rotation angles of the beam FE; Π is the work of external forces.

At the same time, it is assumed that the elastic stiffness of the springs is equivalent to the bending stiffness of the rod. The presented concept of deformation modelling is highly specialized and cannot be directly applied to structural mechanics problems related to the study of spatially kinematically transformable rod systems.

MATERIALS AND METHODS

Finite element modelling of the transformation process of a regular hexagonal lattice with stepwise displacement of contour nodes in the direction of the global X and Y axes was performed using the ANSYS Mechanical software package [18–20]. The APDL programming language built into ANSYS was used to write macros. Each lattice rod and node connection platform were represented as a single beam element.

Let us consider two models of node connections:

- a conventional model linking the displacements and rotation angles of the grid element nodes with the corresponding connection node nodes;
- a model with elastic hinges located between the grid element nodes and the connection node nodes.

The process of transforming the shape of each rod from its initial state to its final state is represented as a sequence of steps. At each step, we first remove the previous finite element mesh, and then build a new mesh based on the node coordinates adjusted to take into account the obtained displacements. In this case, the topological information about the finite element model of the grid is completely preserved. Fig. 2 shows a diagram of the adjustment of the coordinates of the FE nodes at the k -th step of the kinematic transformation.

RESEARCH RESULTS

To demonstrate the proposed concept of deformation-induced shape change, we will perform finite element modelling of the transformation process of a regular bar system from its initial flat state to an arched shape under discrete kinematic action. The diagram of the hex-

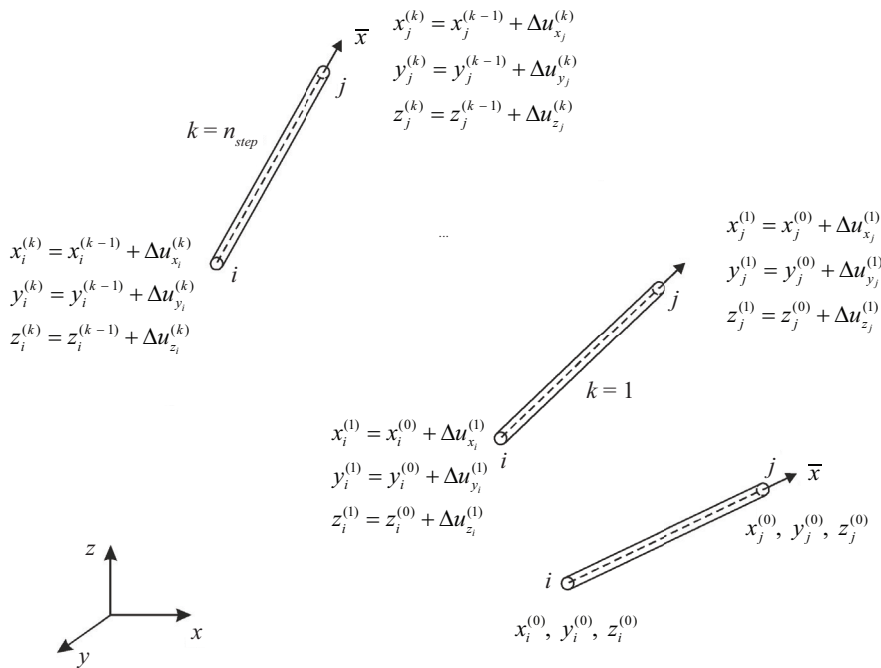


Fig. 2. Schematic representation of the transformation of the geometry of a beam FE (n_{step} — number of loading steps) (figure by the authors)

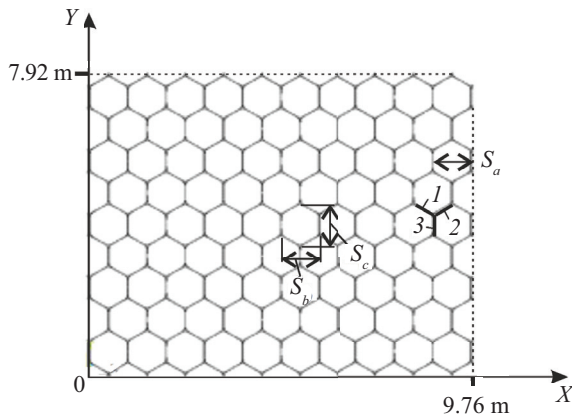


Fig. 3. Diagram of the hexagonal lattice in its initial position (figure by the authors)

agonal regular bar lattice under consideration in its initial (starting) position is shown in Fig. 3.

In Fig. 3, the reference values of the lattice cell dimensions in the initial state are $s_{a,b} = 0.966$ m, $s_c = 1.058$ m; numbers 1–3 denote the rods for which the orientation angles $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ are calculated during the lattice deformation process.

A model of a repeating node connection that allows modelling lattice deformation is shown in Fig. 4. This model includes a platform t , formed from three non-deformable bar elements. Elastic hinges are located at each vertex of the equilateral triangle t between paired nodes i and j .

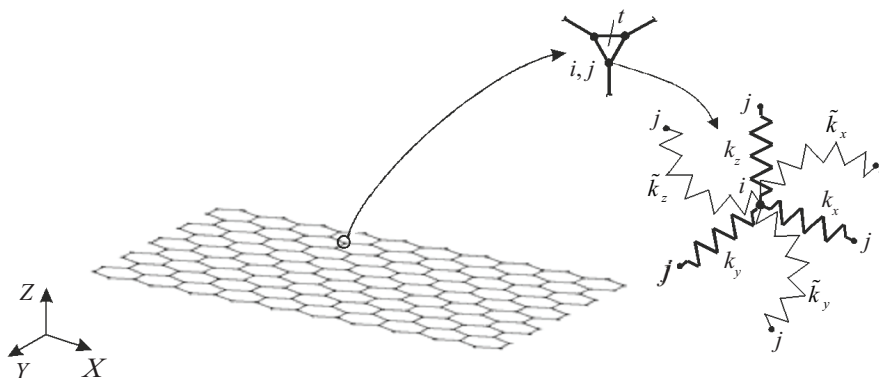


Fig. 4. Diagram of the node connection of the lattice rods (figure by the authors)

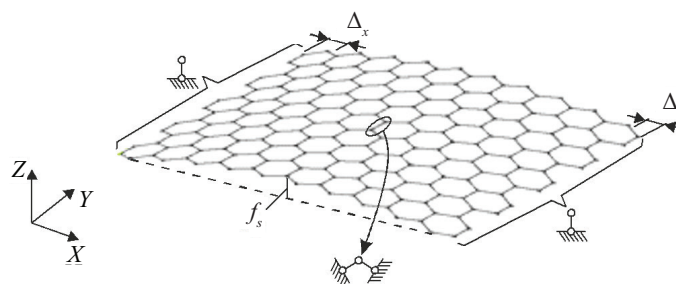


Fig. 5. Calculation diagram corresponding to symmetrical kinematic action Δ_x (figure by the authors)

As shown in Fig. 4, each elastic hinge includes three linear and three torsional springs. The following symbols are used to denote the elements of the elastic hinge: k_x, k_y, k_z — stiffness coefficients of linear springs (N/m) oriented along the X, Y, Z; $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ — corresponding stiffnesses of torsional springs (N·m/rad). Each rod of the lattice is modelled by a single beam FE.

Fig. 5 shows the calculated grid scheme corresponding to the synchronous symmetrical kinematic action on nodes with coordinates $x = 0$ and $x = 9.76$ m. We assign the following parameters for the transformation process: the initial value of the grid lift “arrow” $f_s = 0.01$ m; increment value $\Delta_x = 0.01$ m; number of steps $n_{step} = 200$. In all calculations, we take into account the dead weight of the structure. Note that the “initial” position of the grid under the given static boundary conditions coincides with the first natural mode.

Mechanical constants of lattice rods (aluminum alloy): modulus of elasticity $E = 6.8 \cdot 10^4$ MPa; Poisson’s ratio $\nu = 0.32$; density $\rho = 2,885$ kg/m³. Modulus of elasticity of virtually non-deformable platform rods $E_t = 10^9$ MPa. The lattice rods (length 0.4423 m) and node platforms (length 0.1 m) have a tubular cross-section with an outer diameter of 0.018 m. The pipe wall thickness is 0.0015 m. We assume that the stiffness coefficients k_x, k_y, k_z are numerically equal to the value of E .

The simulation results in the form of graphs showing the dependence of the lift arrow f_s on the number of transformation steps i for different values of the stiffness of the torsion springs are shown in Fig. 6. In Fig. 6, lines 1–4 correspond to the values $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$: 1,000, 3,000, 5,000, 10,000 (N·m/rad). The graph with

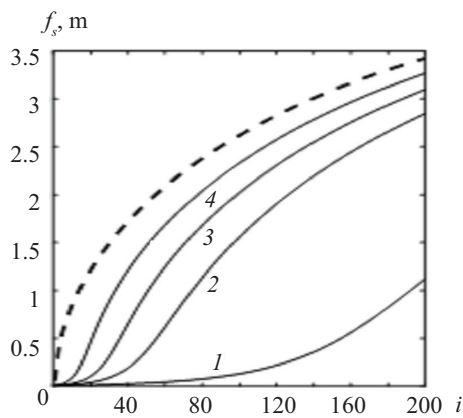


Fig. 6. Graphs of $f_s \sim i$ (figure by the authors)

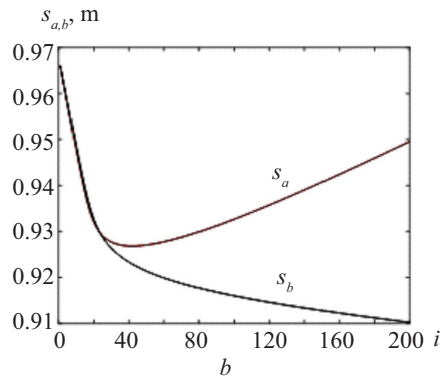
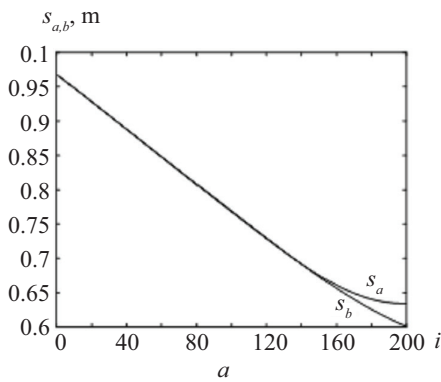
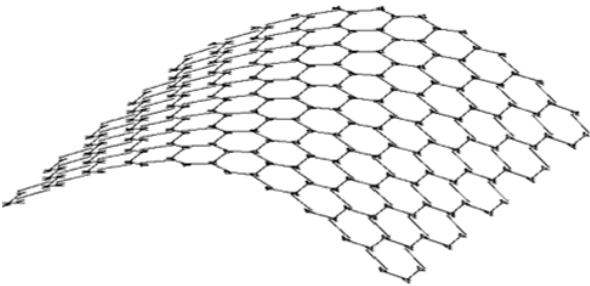
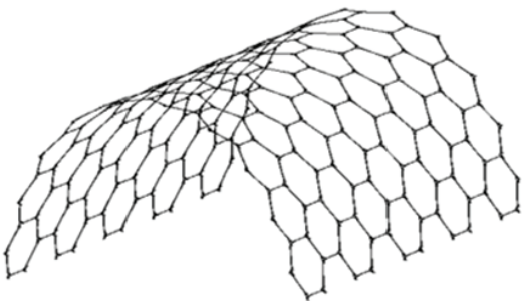


Fig. 8. Graphs $s_{a,b} \sim i$: $a - \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; $b - \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$



a



b

Fig. 7. Arch-shaped grid: $a - \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; $b - \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$ (figure by the authors)

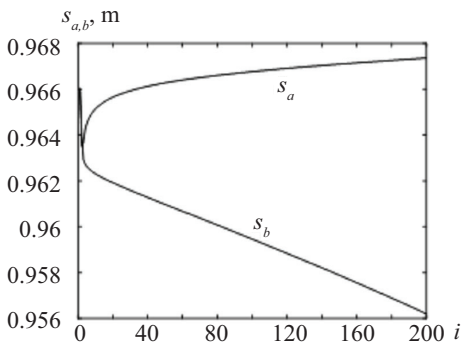


Fig. 9. Graphs of $s_{a,b} \sim i$ for a lattice without elastic hinges

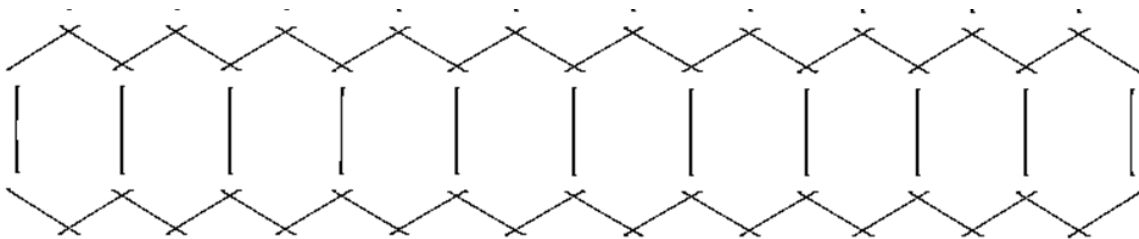


Fig. 10. Fragment of an arched lattice ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$)

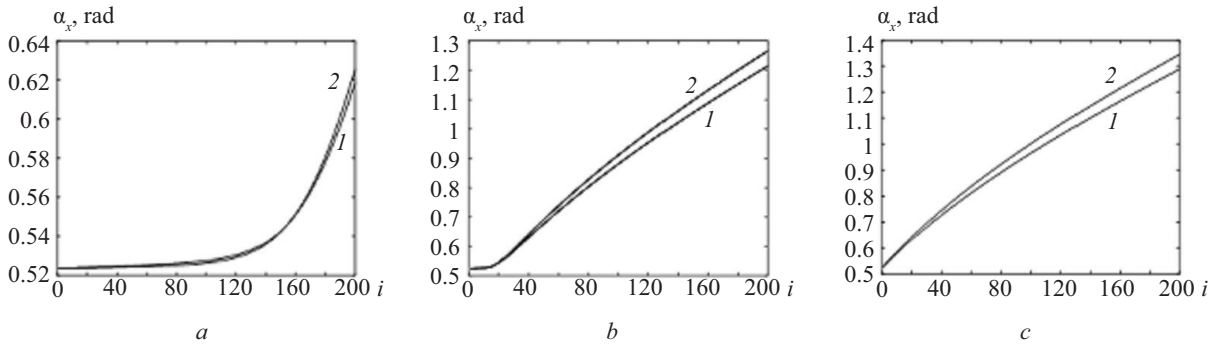


Fig. 11. Graphs $\alpha_x \sim i$: *a* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *b* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *c* — without elastic joints

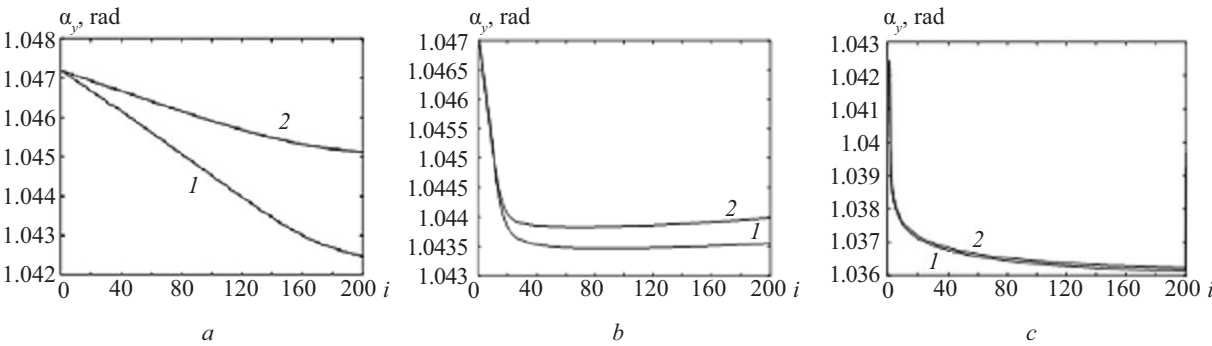


Fig. 12. Graphs $\alpha_y \sim i$: *a* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *b* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *c* — without elastic joints

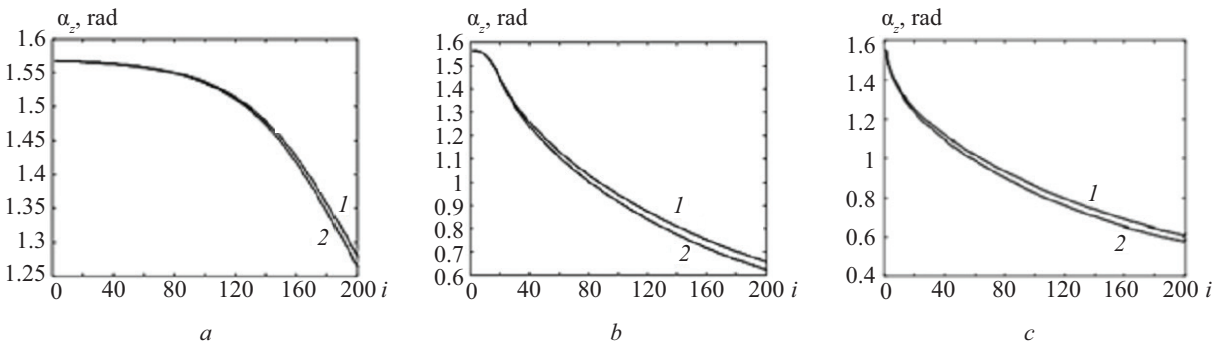


Fig. 13. Graphs $\alpha_z \sim i$: *a* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *b* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *c* — without elastic joints

Results of modal analysis

Without elastic joints		
$\lambda_1 = 1.440 \text{ Hz}$ 	$\lambda_2 = 3.538 \text{ Hz}$ 	$\lambda_3 = 3.707 \text{ Hz}$
With resilient hinges		
$\lambda_1 = 1.404 \text{ Hz}$ 	$\lambda_2 = 2.010 \text{ Hz}$ 	$\lambda_3 = 2.103 \text{ Hz}$

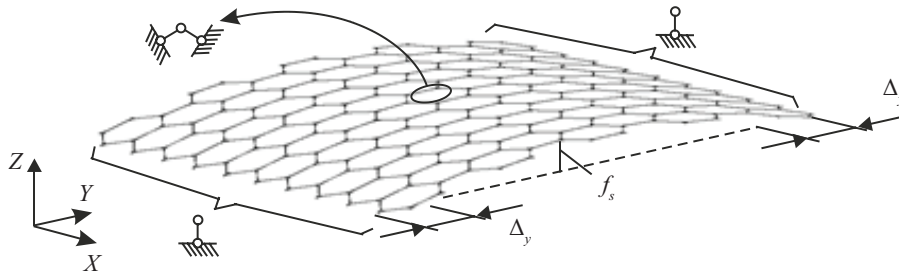


Fig. 14. Calculation diagram corresponding to symmetrical kinematic action Δ_y

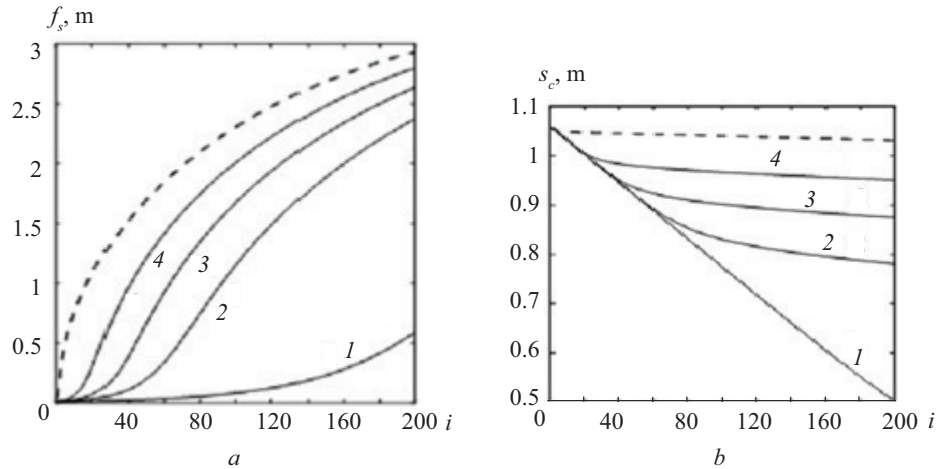


Fig. 15. Graphs: $a — f_s \sim i$; $b — s_c \sim i$

the dashed line corresponds to the grid variant without elastic hinges. The graphs show that the value of f_s depends non-linearly on the magnitude of the kinematic impact on the grid nodes with coordinates $x = 0$ and $x = 9.76$ m. The final arch shape of the grid at $n_{step} = 200$ for $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ 1,000 N·m/rad and 10,000 N·m/rad is shown in Fig. 7.

Graphs showing changes in cell sizes depending on the transformation step are shown in Fig. 8.

For comparison, Fig. 9 shows the graphical dependence of $s_{a,b} \sim i$ for a lattice without elastic hinges. The graphs show that the maximum change in cell size s_b is 0.4 m in Fig. 6, a ; 0.056 m in Fig. 6, b ; and 0.01 m in Fig. 9. The size s_a changes by 0.016 and 0.0014 m, respectively. Moreover, in both cases, the nature of the graphs $s_a \sim i$ qualitatively coincides, i.e., at the beginning of the transformation, there is a sharp decrease, followed by a gradual increase. As expected, the lattice with $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000$ N·m/rad is the most “gutta-percha-like” for a given type of kinematic action. Fig. 10 shows a visualization of a fragment of this lattice at $n_{step} = 200$ (the position of the bar elements adjacent to the support nodes is shown).

It should be noted that in order to develop the design of a hexagonal lattice node connection, it is necessary to have data on the change in the orientation of the rods during the transformation process. For this purpose, a study was carried out on the dependence of the rotation angles $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ of rods 1 and 2 (Fig. 11)

on the transformation step i . The graphs $\alpha_x \sim i, \alpha_y \sim i, \alpha_z \sim i$ for lattices with elastic hinges at parameter values $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ 1,000 N·m/rad, 10,000 N·m/rad, as well as lattices without elastic hinges are shown in Fig. 11–13. The graphs show that the most intense changes during transformation occur in the angles α_x (Fig. 11) and α_z (Fig. 13).

The maximum increase in angle α_x for rod 2 (Fig. 1) is: 5.7° (Fig. 11, a); 43° (Fig. 11, b); 51.6° (Fig. 11, c). At the same time, the angle α_z decreases: 17.6° (Fig. 13, a); 55.6° (Fig. 13, b); 57.3° (Fig. 13, c). The curves in the figures are practically identical, which indicates the synchronism of the rotations of rods 1 and 2. It should be emphasized that the changes in angles α_x and α_z characterize the rotation of rod 2 relative to the X and Z axes, respectively. The angle α_y changes insignificantly during the transformation, by a maximum of 0.4° (Fig. 12, c).

The Table shows the results of modal analysis (the first three eigenpairs) for arch variants without elastic hinges and with elastic hinges, in which $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000$ N·m/rad. As can be seen from the table, the first natural frequencies for the considered arch variants are practically the same. At the same time, the second and third natural pairs differ quantitatively and qualitatively. This is explained by the presence of elastic hinges, which reduce the stiffness of the structure and thus reduce the corresponding natural frequencies.

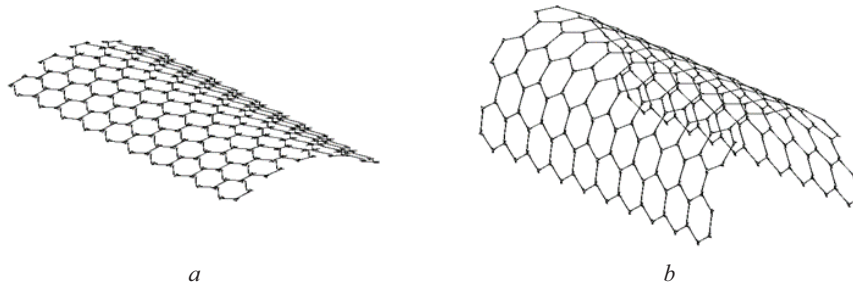


Fig. 16. Arch-shaped grid: *a* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; *b* — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$

As an alternative method of transforming the grid, consider the calculation scheme shown in Fig. 14. In this case, the displacement step is specified along the *Y*-axis. We assume a step $\Delta_y = 0.01 \text{ m}$ and a number of steps $n_{\text{step}} = 200$.

The results of simulating the grid transformation process using the alternative diagram in the form of graphs showing the dependence of the arch rise f_s and the change in cell size s_c on the displacement step i are shown in Fig. 15.

As can be seen from Fig. 15, *b*, the graphs $s_c \sim i$ at values $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$, equal to 3,000, 5,000 and 10,000 are nonlinear (lines 2, 3, 4). At the same time, for values of torsional spring stiffness of 1,000 N·m/rad (line 1) and for a lattice without elastic hinges (dashed line), the dependence $s_c \sim i$ is linear.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The arch shapes of the grid for the stiffness parameters of the torsion springs 1,000 and 10,000 N·m/rad are shown in Fig. 16.

Calculations have shown that for this lattice design (Fig. 12), the maximum rotation angle of rods 1 and 2 at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10,000 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$ does not exceed $\alpha_{\text{zmax}} = 6^\circ$.

Based on the computational experiments performed, it has been established that:

- the proposed direct incremental algorithm for solving a geometrically nonlinear problem is absolutely convergent;
- the developed method for assigning the stiffness of torsion springs can be used in the design of a specific structure of a node connection of regular lattice rods.

REFERENCES

1. Semenov V.S., Akbaraliev R. Transformable coating structures in modern architecture. *Herald of KRSU*. 2010; 10(2):25-31. EDN LMDBGV. (rus.).
2. Lebedev Yu.S., Samokhina T.M. *Transformable structures in modern architecture*. Moscow, TsNTI, 1983; 39. (rus.).
3. Tsaritova N.G., Kurbanov A.Ib., Kurbanova A.A.I. Energy-efficient buildings based on transformable frames. *Building and Reconstruction*. 2022; 6(104):91-103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB. (rus.).
4. De Temmerman N., Mira L.A., Vergauwen A. Hendrickx H., De Wilde W.P. Transformable structures in architectural engineering. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. DOI: 10.2495/hpsm120411
5. Usyukin V.I. *Construction mechanics of space technology structures*. Moscow, Mashinostroenie, 1988; 388. (rus.).
6. Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M. et al. *Mechanics of large space structures*. Moscow, Factorial, 1997; 302. (rus.).
7. Phyto A., Semenov V.N., Fedulov B.N. Optimization of transformable aircraft structures. *Aerospace MAI Journal*. 2024; 31(1):32-40. EDN NXSDGS. (rus.).
8. Sol E.J. *Kinematics and dynamics of multibody system: a systematic approach to systems with arbitrary connections* : Phd Thesis. Technische Hogeschool Eindhoven, 1983. DOI: 10.6100/IR82221
9. Gaydzhurov P.P., Zaritova N.G. Modeling of the process of directed regular transformations hinge-rod systems. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. *Technical Sciences*. 2021; 1(209):5-11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11. EDN HAMXJU. (rus.).
10. Gaydzhurov P., Tsaritova N. Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(3):14-23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
11. Ignat'ev A. V., Ignat'ev V. A., Onishchenko E.V. Possibility of Using Finite Element Method in the Form of Classical Mixed Method for Geometrical Nonlinear Analysis of Hinged-Rod Systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 12:47-58. EDN VBTZQR. (rus.).
12. *Calculations of machine-building structures by the finite element method* : Handbook / Under the general editorship of V.I. Myachenkov. Moscow, Mashinostroenie, 1989; 520. (rus.).

13. Sekulovich M. *The finite element method*. Moscow, Stroyizdat, 1993; 664. (rus.).
14. Popov E.P. *Theory and calculation of flexible elastic rods*. Moscow, Nauka, 1986; 296. (rus.).
15. Svetlitsky V.A. *Mechanics of flexible rods and threads*. Moscow, Mashinostroenie, 1978; 222. (rus.).
16. Battini J.M., Pacoste C. Co-rotational beam elements with warping effects in instability problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002; 191(17-18):1755-1789. DOI: 10.1016/s0045-7825(01)00352-8
17. Kuo-Mo H., Horng-Jann H., Yeh-Ren C. A corotational procedure that handles large rotations of spatial beam structures. *Computers & Structures*. 1987; 27(6):769-781. DOI: 10.1016/0045-7949(87)90-290-2
18. Basov K.A. *ANSYS for designers*. Moscow, DMK Press, 2012; 248. (rus.).
19. Morozov E.M., Muizemnek A.Yu., Shadsky A.S. *ANSYS in the hands of an engineer: mechanics of destruction*. Moscow, URSS, 2008; 453. EDN QJTBZ. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Peter P. Gaydzhurov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Mechanics; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, 344003, Rostov-on-Don, Russian Federation; gpp-161@yandex.ru;

Nadezhda G. Tsaritova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures; **Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ncaritova@yandex.ru;

Nikita A. Korchagin — postgraduate student of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures; **Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ncaritova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Peter P. Gaydzhurov — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Nadezhda G. Tsaritova — scientific guidance, editing of the article, final conclusions.

Nikita A. Korchagin — data collection and processing, text revision.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.517

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.3

Влияние параметров шумозащитного экрана решетчатого типа на его акустическую эффективность

Александр Романович Долгер¹, Николай Георгиевич Канев^{1,2}

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях необходимости снижения шума от технологического оборудования, функционирование которого требует постоянного воздухообмена, возрастает потребность в продуваемых звукоизоляционных конструкциях. Особое внимание уделяется продуваемым шумозащитным экранам, несмотря на отсутствие стандартизованных методик расчета их акустической эффективности. Актуальными представляются исследования экранов ламельного типа, способных сочетать функции шумопонижения и вентилирования оборудования. Рассматривается частный случай такой конструкции — решетка с параллельными зазорами, моделируемая как система тонких жестких пластин, равномерно расположенных по всей высоте экрана.

Материалы и методы. Исследуется периодическая решетка, образованная тонкими жесткими пластинами, равномерно размещенными с регулируемым шагом. Численное моделирование выполнено в программной среде COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием акустического модуля и применением метода конечных элементов. Расчеты проводились для среднегеометрических частот согласно ГОСТ 12090–80: 63, 125, 250, 500 и 1000 Гц при различных комбинациях длины пластин и ширины зазоров между ними. Акустическая эффективность экрана определялась как разность средних уровней звукового давления в области наблюдения за экраном, полученных для случаев с экраном и без него.

Результаты. Максимальная акустическая эффективность достигается при увеличении длины пластин решетчатого экрана и уменьшении зазоров между ними. В ряде конфигураций снижение уровня звукового давления достигало 20 дБ в диапазоне средних и высоких частот (250–1000 Гц). В то же время при частотах 125 Гц и ниже эффективность экрана существенно ограничивается дифракционными эффектами, независимо от геометрических параметров. Результаты подтверждают, что выбор соотношения длины элементов и зазора играет решающую роль в обеспечении требуемого компромисса между акустической эффективностью и проветриванием оборудования.

Выводы. Исследование подтвердило потенциал решетчатых шумозащитных конструкций как эффективного инструмента снижения шума при сохранении продуваемости. В настоящее время нет единой методики оценки акустической эффективности продуваемых экранов, что создает трудности при их проектировании. Результаты настоящей работы могут быть использованы для практических расчетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустическая эффективность экранов, решетчатый шумозащитный экран, широкополосный шум, численное моделирование, метод конечных элементов, стационарный источник шума, решетчатый экран, зона акустической тени

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Долгер А.Р., Канев Н.Г. Влияние параметров шумозащитного экрана решетчатого типа на его акустическую эффективность // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.3

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Долгер, a.dolger@yandex.ru.

The influence of the parameters of a lattice-type noise shield on its acoustic efficiency

Alexandr R. Dolger¹, Nikolay G. Kanev^{1,2}

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

² Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the context of the need to reduce noise from technological equipment, the operation of which requires constant air exchange, there is an increasing interest in ventilated soundproof structures. Special attention is paid to blown noise shields, despite the lack of standardized methods for calculating their acoustic efficiency. Studies of lamellar-type

screens capable of combining the functions of noise reduction and ventilation of equipment seem relevant. In this paper, we consider a special case of such a design — a grid with parallel gaps, modeled as a system of thin rigid plates evenly spaced over the entire height of the screen.

Materials and methods. A periodic lattice formed by thin rigid plates evenly spaced with an adjustable pitch is investigated. Numerical simulation was performed in the COMSOL Multiphysics 6.2 software environment using an acoustic module and using the finite element method. Calculations were performed for geometric mean frequencies according to GOST 12090–80: 63, 125, 250, 500 and 1,000 Hz with various combinations of plate lengths and gap widths between them. The acoustic efficiency of the screen was determined as the difference between the average sound pressure levels in the field of screen observation obtained for cases with and without a screen.

Results. Maximum acoustic efficiency is achieved by lengthening the plates in the grated noise shield and reducing the gaps between them. In a number of configurations, the sound pressure level reduction reached 20 dB in the range of medium and high frequencies (250–1,000 Hz). At the same time, at frequencies of 125 Hz and below, the efficiency of the screen is significantly limited by diffraction effects, regardless of geometric parameters. The results confirm that the choice of element length and clearance ratio plays a crucial role in ensuring the required compromise between acoustic efficiency and ventilation of the equipment.

Conclusions. The study confirmed the potential of lattice noise-proof structures as an effective noise reduction tool while maintaining blowability. Currently, there is no single methodology for evaluating the acoustic efficiency of blown screens, which creates difficulties in their design and underlines the relevance of this study.

KEYWORDS: acoustic efficiency of screens, lattice noise shield, broadband noise, numerical modelling, finite element method, stationary noise source, lattice screen, acoustic shadow zone

FOR CITATION: Dolger A.R., Kanev N.G. The influence of the parameters of a lattice-type noise shield on its acoustic efficiency. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.3

Corresponding author: Alexandr R. Dolger, a.dolger@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Инженерное оборудование, размещаемое на территории населенных пунктов или открытых участках зданий, например на кровле, служит источником шумового загрязнения. Одно из распространенных решений по уменьшению уровня шума — шумозащитные экраны, массивные (довольно часто) сплошные ограждающие конструкции, устанавливаемые вблизи технологического оборудования. Снижение уровня шума в таких системах достигается за счет дифракции звуковых волн, механизм расчета которой хорошо описан в литературе [1, 2]. Основным фактором, определяющим эффективность экрана, выступают его габаритные размеры, однако в силу конструктивных ограничений высота экранов редко превышает 6 м, что тем не менее является высокой конструкцией. В связи с этим предлагаются различные технические усовершенствования, включая звукопоглощающие покрытия [3] и специальные насадки на кромках [4–6].

Одновременно с этим в ряде случаев возникает необходимость обеспечить беспрепятственный приток воздуха к оборудованию, например для систем вентиляции, кондиционирования или охлаждающих агрегатов. Герметичное ограждение таких установок может нарушить их функционирование, что ставит перед проектировщиками задачу поиска компромисса между акустической эффективностью и циркуляцией воздуха. Одним из возможных решений выступают продуваемые конструкции — экраны ламельного типа [7–9], представляющие собой периодические решетки из отдельных жестких пластин, расположенных с постоянным шагом и наклоном (рис. 1).

Частный случай ламельных экранов — решетчатые экраны — это решетка из тонких пластин одинаковой ширины, расположенных в одной плоскости на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2). Наличие зазоров между пластинами обеспечивает циркуляцию воздуха, позволяя при этом снижать техногенный шум.

Вопросы защиты от техногенного шума активно изучаются в рамках архитектурно-строительной акустики [10–14]. В нормативных документах¹ зафиксированы предельно допустимые уровни звукового давления, а также основные подходы к его снижению. Наиболее широко исследованы и применяются сплошные шумозащитные конструкции. Так, в работе И.Л. Шубина и соавт. [1] анализируются методы проектирования транспортных шумозащитных экранов, ориентированные преимущественно на массивные герметичные конструкции. В то же время продуваемые экраны, обладающие меньшими массогабаритными характеристиками и способностью обеспечивать вентиляцию, остаются менее изученными. Ряд исследований в последние годы направлен на восполнение этого пробела. В статье Т. Astrauskas, Р. Baltrėnas, Т. Januševičius и Р. Grubliauskas [15] рассматривается продуваемый решетчатый экран для защиты от транспортного шума. Авторы провели экспериментальные испытания и CFD-моделирование, выявив влияние угла наклона ламелей и толщины звукопоглощающего слоя на акустическую эффективность. Наилучшие результаты достигались при угле 45°

¹ СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. М. : Минрегион России, 2011. 72 с.

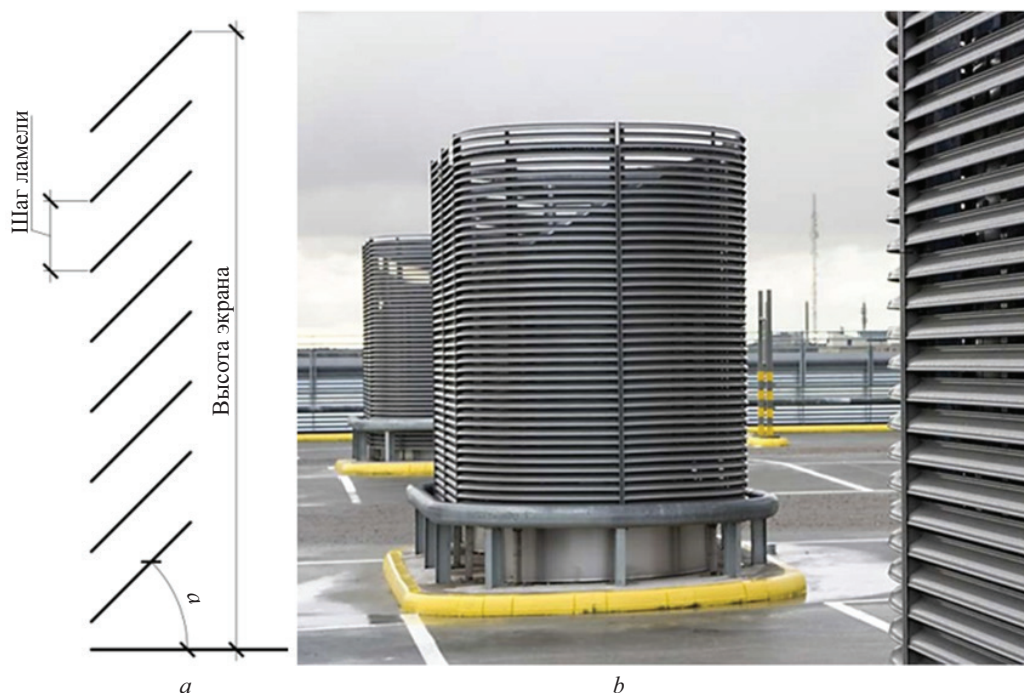


Рис. 1. Шумозащитный экран ламельного типа: *a* — схема экрана; *b* — пример использования ламельных экранов на кровле здания

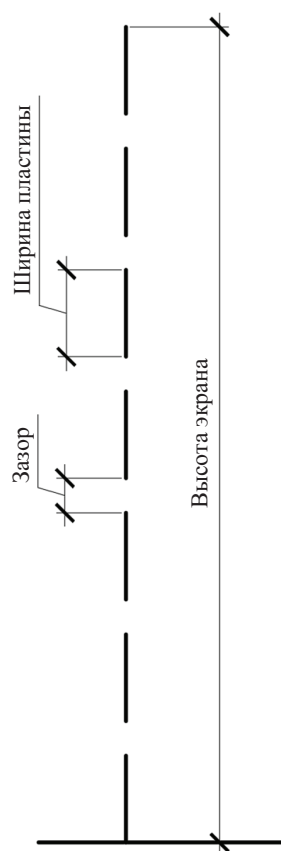


Рис. 2. Схема решетчатого экрана

и наличии слоя минеральной ваты. В работе В. Не, Х. Xiao, Х. Zhou, J. Nan и Х. Jin [16] выполнено численное моделирование акустических характеристик

различных продуваемых экранов, используемых на высокоскоростных железных дорогах. Установлено, что эффективность таких экранов варьируется в зависимости от геометрии и частоты, а также от типа ограждения (V-образные, цилиндрические и решетчатые). Обзор I. Ekici и Н. Bougdah [17] содержит систематизацию данных по акустическим экранам различных типов, включая звукопоглощающие и перфорированные структуры, с акцентом на геометрию и материалы.

В публикации Н.Г. Канева и А.А. Маяка [18] проведена оценка влияния геометрических параметров ламельного экрана на его акустическую эффективность. Теоретической основой для анализа эффективности таких конструкций служит классическая дифракционная теория, включая методы Кирхгофа, Зоммерфельда и Винера – Хопфа, успешно применяемые в задачах акустики и волновой механики [19, 20].

Настоящее исследование направлено на дальнейшее развитие подходов к оценке акустических свойств продуваемых решетчатых экранов с акцентом на изучение влияния геометрических параметров конструкции на снижение шума.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование решетчатого шумозащитного экрана выполнено в программной среде COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием модуля Pressure Acoustics, Frequency Domain. Моделирование осуществлялось в двумерной постановке в рамках линейной акустики в частотной области. Геометри-

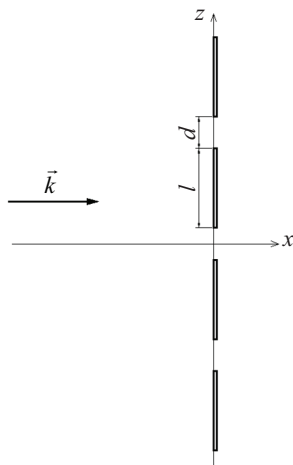


Рис. 3. Плоская решетка пластин

ческая модель экрана — это вертикально ориентированная решетка, образованная тонкими абсолютно жесткими пластинами (толщиной 0,02 м), размещенными на равных интервалах, на пластинах выполняется граничное условие:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \tag{1}$$

где p — звуковое давление; n — нормаль к поверхности.

Решетка пластин расположена в плоскости $x = 0$. Вдоль оси x распространяется плоская звуковая волна k , падающая нормально на решетку пластин. Постановка задачи приведена на рис. 3.

Задача моделирования сводится к определению звукового поля за решеткой и оценке уровня осла-

бления звука, прошедшего через нее, в зависимости от длины пластин l и величины зазора d между ними. Для расчета акустического поля использован метод конечных элементов.

Численная модель построена в двумерной расчетной области, представляющей собой пространство размерами 30×20 м. Ось x направлена горизонтально, ось y — вертикально. Схематическое представление геометрии представлено на рис. 4.

В качестве граничных условий использовались жесткие стенки (Sound Hard Boundary) и импедансные границы (Impedance): граница $y = 0$ — абсолютно жесткая, на границах $x = 0$, $x = 30$, $y = 20$ — акустический импеданс, равный ρc , где ρ — плотность воздуха; c — скорость звука в нем, что минимизировало отражение звуковых волн от внешней границы расчетной области.

Варьировались три ключевых параметра: длина пластин l (0,1; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 м), ширина зазора d между ними (0,05; 0,1; 0,2; 0,4 и 0,5 м) и частота источника шума ω . Высота экрана составляла 4 м.

Акустический источник моделировался как монохромный точечный излучатель, расположенный на высоте 2 м и на расстоянии 4 м перед экраном. Расчеты проводились для октавных среднегеометрических частот, регламентированных ГОСТ 12090–80: 63, 125, 250, 500 и 1000 Гц.

Для оценки акустической эффективности применялось сравнение средних уровней звукового давления в области за экраном. В качестве контрольной зоны использовалась прямоугольная область размером 3×18 м, обозначенная на рис. 4 за экраном. Расчет акустической эффективности осуществлялся

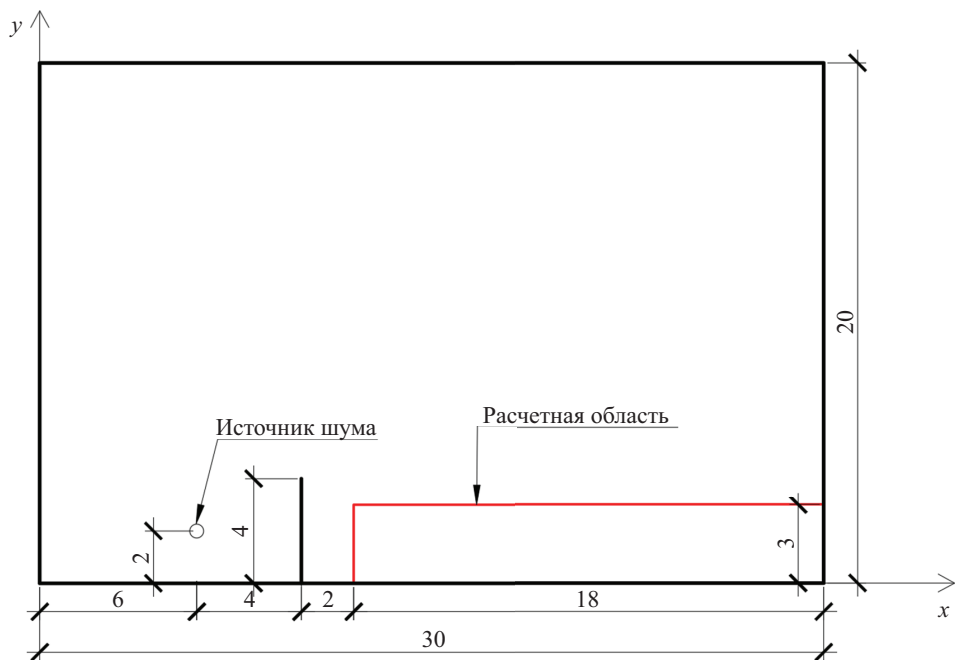


Рис. 4. Расчетная схема численного эксперимента

как разность средних уровней звукового давления без экрана и с экраном:

$$R = L_0 - L_1, \quad (2)$$

где L_0 — уровень звукового давления в расчетной области без учета экрана; L_1 — уровень звукового давления в расчетной области с учетом шумозащитного экрана.

Конечно-элементная сетка формировалась с максимальным шагом, не превышающим $1/16$ длины волны на максимальной частоте (1000 Гц), и минимальным шагом, равным $1/32$ длины волны. Такой выбор параметров обеспечивал необходимую точность моделирования, что подтверждается применением аналогичных требований в практике численного анализа акустических задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование было выполнено с учетом варьирования трех ключевых параметров решетчатого экрана: длины жестких вертикальных пластин l , ширины зазора между ними d и частоты источника шума ω , соответствующей среднегеометрическим октавным полосам. Всего в ходе исследования проведено 130 расчетов, охватывающих различные сочетания указанных параметров. Для каждой комбинации строилось поле распределения уровня звукового давления в области за экра-

ном, на основе которого определялась акустическая эффективность конструкции.

В качестве примера на рис. 5 представлен один из вариантов поля распределения уровня звукового давления при среднегеометрической частоте 500 Гц в расчетной области: a — без шумозащитного экрана; b — с установленным решетчатым экраном со следующими параметрами: $l = 0,5$ м; $d = 0,5$ м.

В отсутствии экрана (рис. 5, a) наблюдается равномерное распространение звуковых волн от точечного источника, формирующее характерное волновое поле. Направленность звукового поля обусловлена интерференцией и дифракцией волн, при этом уровень звукового давления (УЗД) постепенно снижается по мере удаления фронта волны от источника. В случае установки решетчатого экрана (рис. 5, b) формируется зона повышенного УЗД перед преградой вследствие отражения и интерференции падающих на экран волн. За экраном возникает зона акустической тени — область с существенно ослабленным уровнем звукового давления. УЗД в этой зоне снижается по мере удаления от экрана, что свидетельствует об эффективности решетчатой конструкции в подавлении звукового излучения.

Результаты исследования обобщены в виде графиков зависимости эффективности решетчатого экрана от геометрических характеристик при различных частотах (рис. 6).

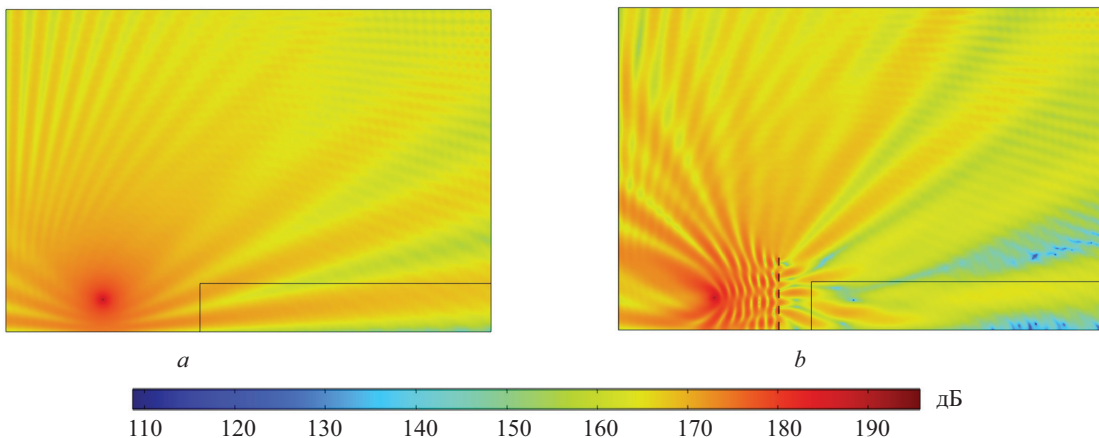
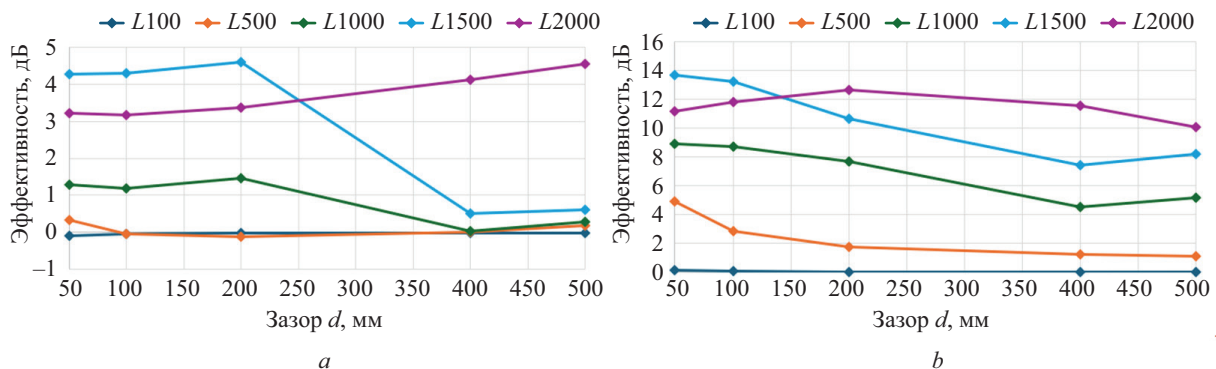


Рис. 5. Поле распределения уровня звукового давления на частоте 500 Гц: a — без шумозащитного экрана; b — с шумозащитным экраном



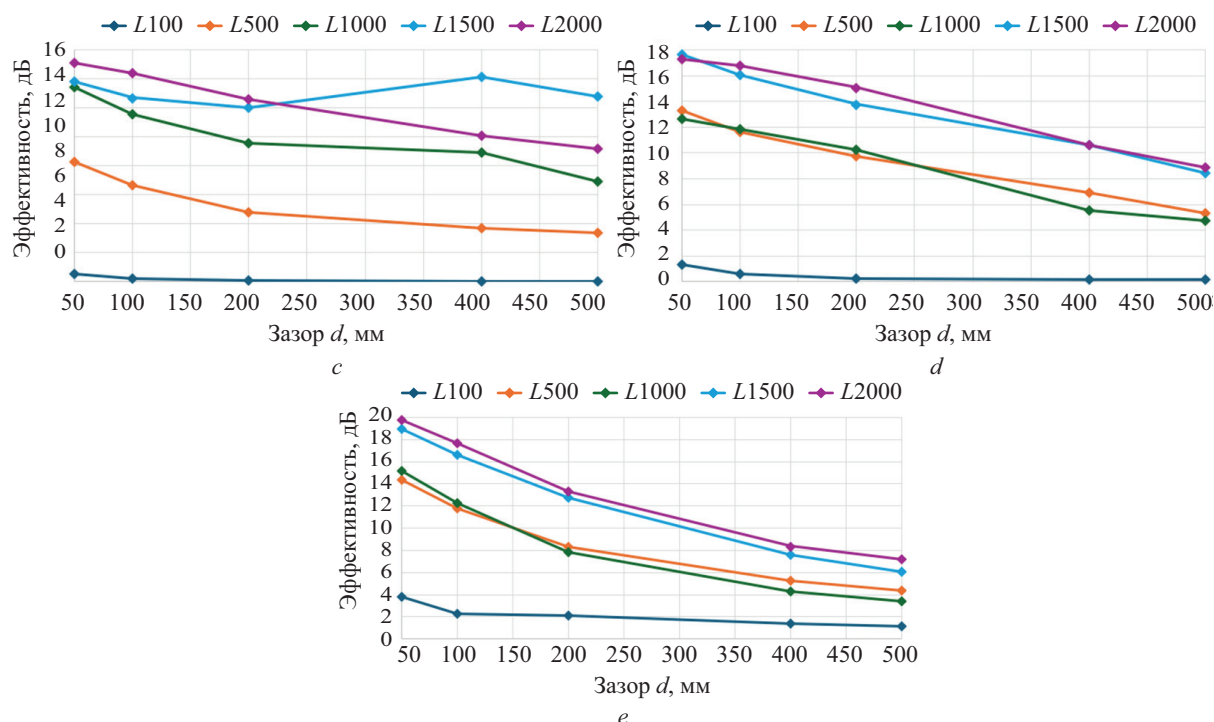


Рис. 6. Результаты расчетов эффективности решетчатого экрана в зависимости от длины пластины l и ширины зазора d : a — 63 Гц; b — 125 Гц; c — 250 Гц; d — 500 Гц; e — 1000 Гц

При частоте 63 Гц акустическая эффективность экрана остается низкой независимо от геометрических параметров. Исключением является случай с длиной пластин 1,5–2,0 м и зазорами до 0,2 м, при котором достигается снижение уровня звукового давления до 5 дБ.

Уже при частоте 125 Гц наблюдается выраженное повышение эффективности. При длине пластин от 1,0 до 2,0 м и зазорах 0,1–0,2 м уровень снижения УЗД достигает 10–13 дБ. Несмотря на то, что это все еще уступает значениям, достигаемым на более высоких частотах, данные результаты подтверждают целесообразность применения экрана в условиях низкочастотного шума.

Наиболее высокие значения эффективности зафиксированы в диапазоне частот 250–1000 Гц при длине пластин 1,5–2,0 м. В этом случае при зазорах 0,1–0,2 м уровень снижения звукового давления достигает до 20 дБ. Однако при увеличении зазора свыше 0,2 м отмечается заметное падение эффективности, особенно в частотном диапазоне 500–1000 Гц.

Графики для частот 500 и 1000 Гц демонстрируют нехарактерное поведение: кривые, соответствующие длинам пластин 1,5 и 2,0 м, а также 0,5 и 1,0 м, группируются. Отдельного внимания заслуживает случай с длиной пластин 0,1 м, при котором эффективность экрана стремится к нулю вне зависимости от ширины зазора и частоты. Это объясняется тем, что короткие пластины, независимо от ширины зазора, практически не формируют значимого препятствия для распространения звуковой волны.

Полученные зависимости могут быть использованы при инженерном расчете параметров решетчатых шумозащитных экранов.

При заданном уровне требуемого шумоподавления возможно подобрать комбинацию длины пластин и ширины зазора, обеспечивающую как акустическую эффективность, так и необходимую продуваемость.

При проектировании и реализации вентилируемых шумозащитных экранов решетчатого типа необходимо учитывать не только акустические характеристики, но и требования к обеспечению воздушного потока. Поскольку слишком узкие зазоры между элементами экрана могут ограничивать необходимую вентиляцию, задача подбора оптимальной конфигурации требует баланса между звукоизоляцией и аэродинамикой. Эти аспекты выходят за рамки настоящего исследования и предполагают отдельное рассмотрение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Акустическая эффективность решетчатого шумозащитного экрана определяется, в первую очередь, соотношением между длиной пластин и шириной зазора, а также зависит от частоты шумового источника. Максимальное снижение уровня звукового давления до 20 дБ достигается при длине пластин 1,5–2,0 м и зазорах не более 0,2 м преимущественно в диапазоне частот 250–1000 Гц. Менее заметный, но значимый эффект обеспечивается также при длине пластин 0,5–1,0 м и зазоре между ними до 0,2 м, снижение уровня звукового давления составляет до 10 дБ. С практической точки зрения рассматриваемая конфигурация представляется одной из наиболее целесообразных для применения.

При увеличении ширины зазора более 0,2 м отмечается выраженное снижение воздействия эффективности на всех исследуемых среднегеометрических частотах.

Полученные графические зависимости рекомендуется использовать при выборе оптимальной геометрической конфигурации экрана для конкретных условий эксплуатации с обязательным учетом его высоты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шубин И.Л., Цукерников И.Е., Писарски А. Основы проектирования транспортных шумозащитных экранов. М. : Бастет, 2015. 207 с.
2. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens // Wave Motion. 1986. Vol. 8. Issue 3. Pp. 225–234. DOI: 10.1016/S0165-2125(86)80045-2
3. Комкин А.И., Назаров Г.М. Особенности дифракции звука на звукопоглощающем экране // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 303–307. DOI: 10.31857/S0320791921030072. EDN DYPNGA.
4. Комкин А.И., Мусаева Р.Н. Особенности уменьшения уровня звука экранами Т-образного профиля // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 6. С. 756–764. DOI: 10.31857/S0320791923600233. EDN CAFRCD.
5. Урусовский И.А. Дифракция звука на экране с веерной насадкой // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 1. С. 86. DOI: 10.7868/S0320791912060135. EDN PNRSHJ.
6. Voropayev S.I., Ovenden N.C., Fernando H.J.S., Donovan P.R. Finding optimal geometries for noise barrier tops using scaled experiments // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Vol. 141. Issue 2. Pp. 722–736. DOI: 10.1121/1.4974070
7. Долгер А.Р., Канев Н.Г. Об особенностях расчета шумозащитных экранов для широкополосных источников шума // Акустика среды обитания : мат. X Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. 2025. С. 147–154.
8. Kanev N.G., Dolger A.R. Sound attenuation of louvered noise barriers for industrial equipment // Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association (EuroNoise). 2025.
9. Долгер А.Р. Эффективность ламельных шумозащитных экранов: численное моделирование и анализ зон затенения // Молодежные инновации : сб. ст. VIII Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2025. С. 50–56.
10. Бужинский К.В., Фиев К.П., Шашурин А.Е., Лубянченко А.А. Исследование возможности применения термочехлов для снижения уровня шума от оборудования // Noise Theory and Practice. 2020. Т. 6. № 4 (22). С. 135–147. EDN ADSJUO.
11. Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В., Попов С.В. Облегченные звукозащитные панели // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 226–234. EDN XGAKUT.
12. Ivanov N.I., Boiko I.S., Shashurin A.E. The problem of high-speed railway noise prediction and reduction // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp. 539–546. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.086
13. Chang L., Li X., Guo Z., Cao Y., Lu Y., Garziera R., Jiang H. On-demand tunable metamaterials design for noise attenuation with machine learning // Materials & Design. 2024. Vol. 238. P. 112685. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112685
14. Романов Н.В., Пегин П.А. Современные конструкции шумозащитных экранов // Noise Theory and Practice. 2022. Т. 8. № 1 (28). С. 17–28. EDN JQZBYP.
15. Astrauskas T., Baltrėnas P., Janušėvičius T., Grubliauskas R. Louvred noise barrier for traffic noise reduction // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2021. Vol. 16. Issue 1. Pp. 140–154. DOI: 10.7250/bjrbe.2021-16.519
16. He B., Xiao X.B., Zhou X., Han J., Jin X.S. Characteristics of Sound Insulation and Insertion Loss of Different Deloading Sound Barriers for High-Speed Railways // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2015. Pp. 345–352. DOI: 10.1007/978-3-662-44832-8_41
17. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental noise barriers // Building Acoustics. 2003. Vol. 10. Issue 4. Pp. 289–323. DOI: 10.1260/13510-1003772776712
18. Маяк А.А., Канев Н.Г. Оценка эффективности снижения шума экранами ламельного типа // Акустика среды обитания : мат. VIII Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. 2023. С. 197–201. EDN MFYYRY.
19. Макаров О.И., Шанин А.В., Корольков А.И. Интеграл Зоммерфельда в задачах моделирования дифракции акустических волн с помощью треугольной сетки // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 2. С. 129–145. DOI: 10.31857/S0320791923600105. EDN IULQGZ.
20. Бабич В.М., Лялинов М.А., Грикуров В.Э. Метод Зоммерфельда – Малюжинца в теории дифракции. СПб., 2004. 93 с. EDN QJMUCZ.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Долгер — аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; a.dolger@yandex.ru;

Николай Георгиевич Канев — доктор физико-математических наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией № 42 «Акустика залов»; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; SPIN-код: 7695-4001, РИНЦ ID: 126777, Scopus: 6602609776, ResearcherID: ABE-5579-2020, ORCID: 0000-0001-6512-7131; nikolay.kanev@mail.ru.

Вклад авторов:

Долгер А.Р. — создание расчетной модели, выполнение расчетов, анализ результатов, проведение исследования, написание и оформление статьи.

Канев Н.Г. — научное руководство, формулирование концепции исследования и научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Engineering equipment placed on the territory of settlements or in open areas of buildings, for example, on the roof, is a source of noise pollution. One of the common solutions to reduce noise levels are noise barriers — massive (quite often) solid enclosing structures installed near technological equipment. Noise reduction in such systems is achieved by diffraction of sound waves, the calculation mechanism of which is well described in the literature [1, 2]. The main factor determining the effectiveness of the screen is its overall dimensions, however, due to design limitations, the height of the screens rarely exceeds 6 m, which, nevertheless, is quite a tall

structure. In this regard, various technical improvements are proposed, including sound-absorbing coatings [3] and special nozzles on the edges [4–6].

At the same time, in some cases it becomes necessary to ensure an unhindered air flow to the equipment, for example, for ventilation, air conditioning or cooling units. The hermetic enclosure of such installations can disrupt their functioning, which poses the challenge for designers to find a compromise between acoustic efficiency and air circulation. One of the possible solutions is blown structures — lamella-type screens [7–9], which are periodic lattices of separate rigid plates arranged with a constant pitch and tilt (Fig. 1).

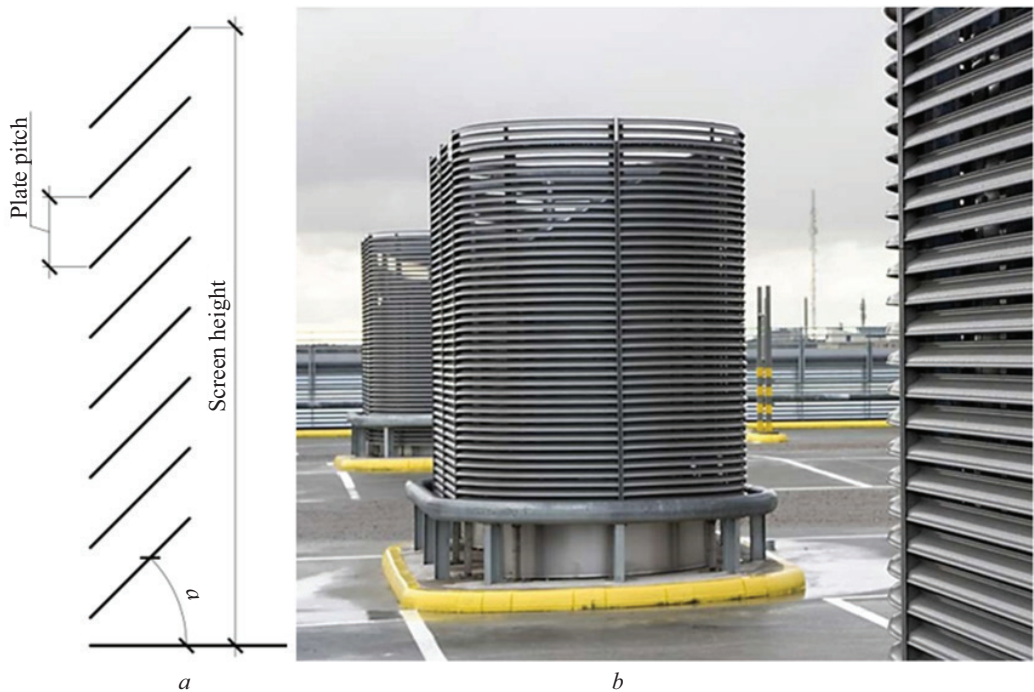


Fig. 1. Lamel type noise shield: a — screen diagram; b — example of using lamel screens on the roof of a building

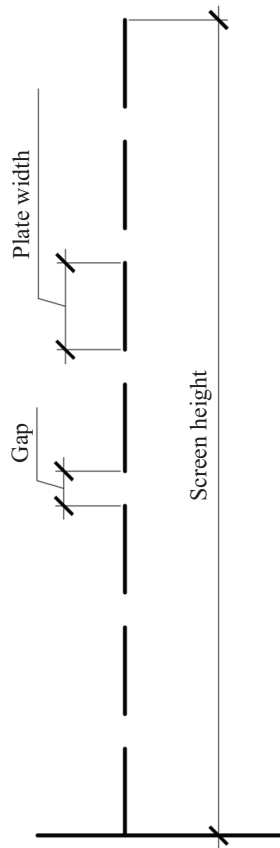


Fig. 2. Grid screen diagram

A special case of lamella screens are lattice screens — a grid of thin plates of the same width located in the same plane at a certain distance from each other (Fig. 2). The presence of gaps between the plates provides air circulation, while reducing anthropogenic noise.

The issues of protection from man-made noise are actively studied within the framework of architectural and construction acoustics [10–14]. The regulatory documents¹ set out the maximum permissible sound pressure levels, as well as the main approaches to its reduction. Solid noise-proof structures are the most widely researched and used. Thus, in the work of I.L. Shubin and co-authors [1], methods of designing transport noise barriers are considered, focused mainly on massive hermetic structures. At the same time, blown screens, which have lower weight and size characteristics and the ability to provide ventilation, remain less studied. A number of studies in recent years have been aimed at filling this gap. For example, an article by T. Astrauskas, P. Baltrėnas, T. Januševičius, and R. Grubliauskas [15] discusses a blown lattice screen to protect against traffic noise. The authors conducted experimental tests and CFD simulations, revealing the influence of the angle of inclination of the lamellae and the thickness of the sound-

absorbing layer on acoustic efficiency. The best results were achieved at an angle of 45° and with a layer of mineral wool. In the work of B. He, X. Xiao, X. Zhou, J. Han, and X. Jin [16] performed numerical modeling of the acoustic characteristics of various blown screens used on high-speed railways. It has been found that the effectiveness of such screens varies depending on the geometry and frequency, as well as the type of enclosure (V-shaped, cylindrical and lattice). Review by I. Ekici and H. Bougdah [17] contains a systematization of data on acoustic screens of various types, including sound-absorbing and perforated structures, with an emphasis on geometry and materials.

In the work of N.G. Kanev and A.A. Mayak [18], the influence of the geometric parameters of the lamella screen on its acoustic efficiency was evaluated. The theoretical basis for analyzing the effectiveness of such structures is classical diffraction theory, including the methods of Kirchhoff, Sommerfeld, and Wiener Hopf, which are successfully applied in problems of acoustics and wave mechanics [19, 20].

The present work is aimed at further developing approaches to assessing the acoustic properties of blown lattice screens, with an emphasis on investigating the effect of geometric design parameters on noise reduction.

MATERIALS AND METHODS

The present work is aimed at further developing approaches to assessing the acoustic properties of blown lattice screens, with an emphasis on investigating the effect of geometric design parameters on noise reduction.

Numerical simulation of a grated noise shield was performed in the COMSOL Multiphysics 6.2 software environment using the Pressure Acoustics, Frequency Domain module. The simulation was carried out in a two-dimensional formulation, within the framework of linear acoustics in the frequency domain. The geometric model of the screen was a vertically oriented grid formed by thin absolutely rigid plates (0.02 m thick) placed at equal intervals, the boundary condition is fulfilled on the plates:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad (1)$$

where p — is the sound pressure; n — is the normal to the surface.

The plate grid is located in the $x = 0$ plane. A plane sound wave k propagates along the x -axis, incident normally on the plate grid. The problem statement is shown in Fig. 3.

The modelling task boils down to determining the sound field behind the grate and estimating the level of attenuation of the sound passing through it, depending on the length of the plates l and the size of the gap d between them. The finite element method is used to calculate the acoustic field.

The numerical model is constructed in a two-dimensional computational domain, which is a space measur-

¹ CP 51.13330.2011. Noise protection. Updated edition of SNiP 23-03-2003. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2011; 72.

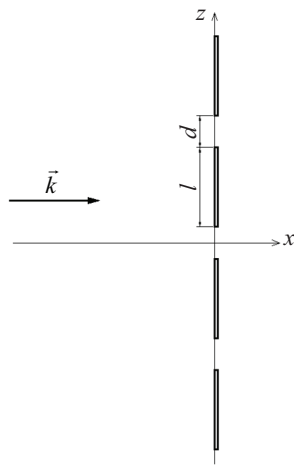


Fig. 3. Flat plate grid

ing 30×20 m. The x -axis is horizontal, and the y -axis is vertical. A schematic representation of the geometry is shown in Fig. 4.

Rigid walls (Sound Hard Boundary) and impedance boundaries were used as boundary conditions: the boundary $y = 0$ is absolutely rigid, at the boundaries $x = 0, x = 30, y = 20$ is the acoustic impedance equal to ρc , where ρ is the density of air; c is the speed of sound in it, this minimized the reflection of sound waves from the outer boundary of the computational domain.

Three key parameters varied: the length of the plates l (0.1; 0.5; 1.0; 1.5 and 2.0 m), the width of the gap d between them (0.05; 0.1; 0.2; 0.4 and 0.5 m) and the frequency of the noise source ω . The screen height was 4 m.

The acoustic source was modeled as a monochrome point emitter located at a height of 2 m and at a distance of 4 m in front of the screen. Calculations were per-

formed for octave geometric mean frequencies regulated by GOST 12090–80: 63, 125, 250, 500 and 1,000 Hz.

To assess the acoustic efficiency, a comparison of the average sound pressure levels in the area behind the screen was used. A rectangular area measuring 3×18 m was used as a control zone, indicated in Fig. 4 behind the screen. The acoustic efficiency was calculated as the difference between the average sound pressure levels without a screen and with a screen:

$$R = L_0 - L_1, \tag{2}$$

where L_0 is the sound pressure level in the design area without taking into account the screen; L_1 is the sound pressure level in the design area, taking into account the noise shield.

The finite element grid was formed with a maximum step not exceeding $1/16$ of the wavelength at the maximum frequency (1,000 Hz) and a minimum step of $1/32$ of the wavelength. This choice of parameters provided the necessary modelling accuracy, which is confirmed by the application of similar requirements in the practice of numerical analysis of acoustic problems.

RESULTS

Numerical simulation was performed taking into account the variation of three key parameters of the lattice screen: the length of the rigid vertical plates l , the width of the gap between them d , and the frequency of the noise source ω corresponding to the geometric mean octave bands. In total, 130 calculations were performed during the study, covering various combinations of these parameters. For each combination, a sound pressure level distribution field was constructed in the area behind the screen, on the basis of which the acoustic efficiency of the structure was determined.

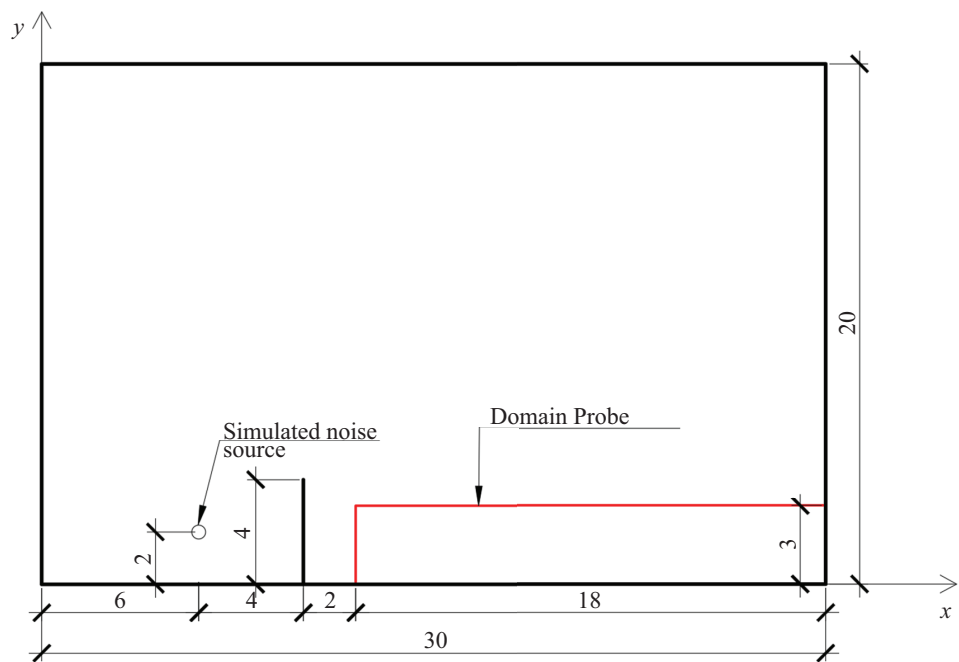


Fig. 4. Calculation scheme of the numerical experiment

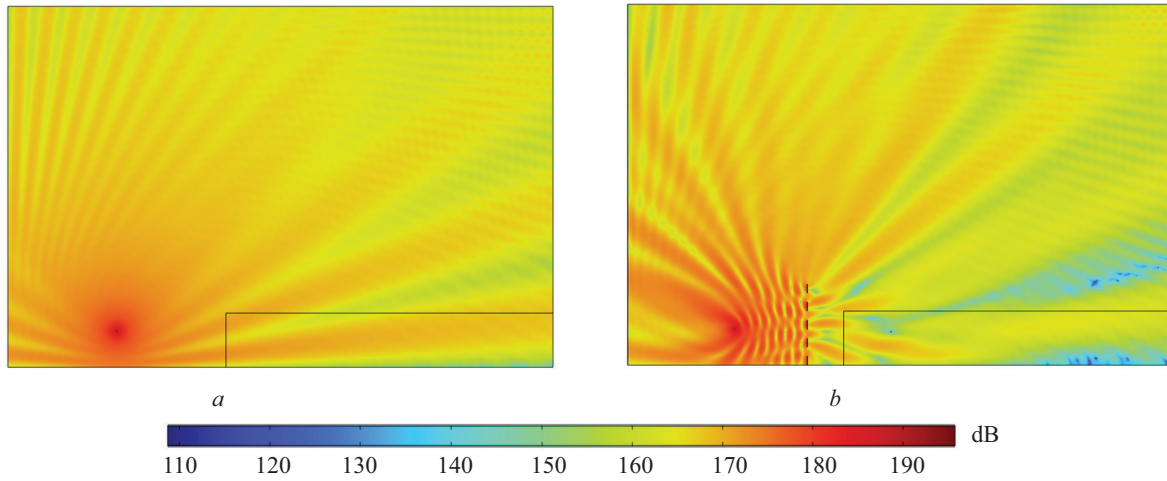


Fig. 5. Sound pressure level distribution field at 500 Hz: *a* — without noise shield; *b* — with noise shield

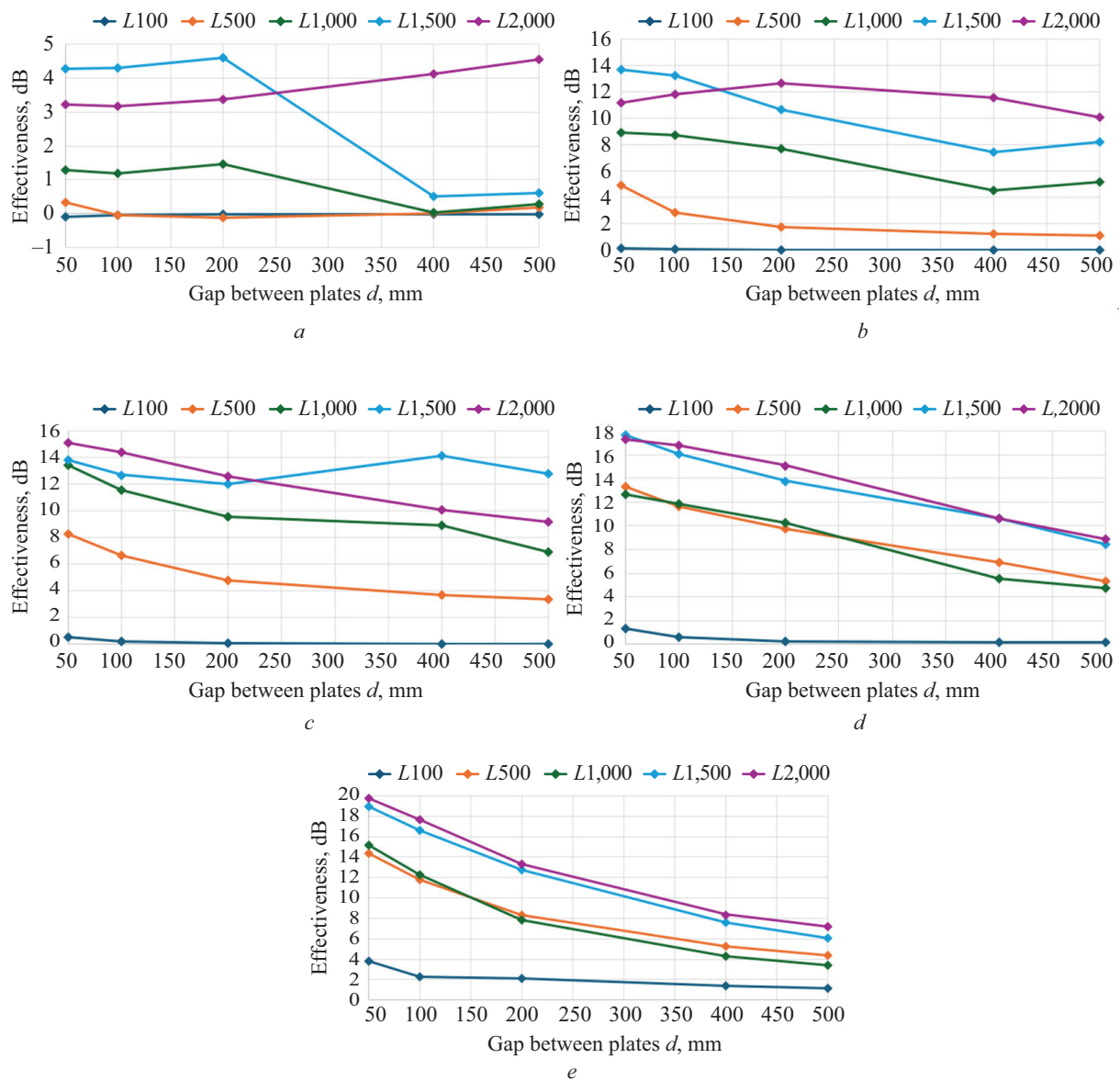


Fig. 6. The results of calculations of the efficiency of the lattice screen depending on the length of the plate *l* and the width of the gap *d*: *a* — 63 Hz; *b* — 125 Hz; *c* — 250 Hz; *d* — 500 Hz; *e* — 1,000 Hz

As an example, Fig. 5 shows one of the variants of the sound pressure level distribution field at an average geometric frequency of 500 Hz in the design area: *a* — without a noise shield; *b* — with an installed grating screen with the following parameters: $l = 0.5$ m; $d = 0.5$ m.

In the absence of a screen (Fig. 5, *a*), a uniform propagation of sound waves from a point source is observed, forming a characteristic wave field. The directionality of the sound field is caused by interference and diffraction of waves, while the sound pressure level gradually decreases as the wave front moves away from the source. In the case of the installation of a lattice screen (Fig. 5, *b*), a zone of increased RCD is formed in front of the barrier due to the reflection and interference of waves incident on the screen. An acoustic shadow zone appears behind the screen, an area with a significantly weakened sound pressure level. The efficiency in this zone decreases as you move away from the screen, which indicates the effectiveness of the lattice structure in suppressing sound radiation.

The results of the study are summarized in the form of graphs of the dependence of the efficiency of the lattice screen on geometric characteristics at various frequencies (Fig. 6).

At a frequency of 63 Hz, the acoustic efficiency of the screen remains low regardless of the geometric parameters. The exception is the case with a plate length of 1.5–2.0 m and gaps of up to 0.2 m, which reduces the sound pressure level to 5 dB.

Already at a frequency of 125 Hz, there is a marked increase in efficiency. With plate lengths from 1.0 to 2.0 m and gaps of 0.1–0.2 m, the reduction level of the RCD reaches 10–13 dB. Despite the fact that this is still inferior to the values achieved at higher frequencies. These results confirm the feasibility of using the screen in conditions of low-frequency noise.

The highest efficiency values were recorded in the frequency range of 250–1,000 Hz with a plate length of 1.5–2.0 m. In this case, with gaps of 0.1–0.2 m, the sound pressure reduction level reaches up to 20 dB. However, with an increase in the gap above 0.2 m, there is a noticeable decrease in efficiency, especially in the frequency range of 500–1,000 Hz.

The graphs for frequencies of 500 and 1,000 Hz show uncharacteristic behavior: the curves correspond-

ing to plate lengths of 1.5 and 2.0 m, as well as 0.5 and 1.0 m, are grouped. Special attention should be paid to the case with a plate length of 0.1 m, in which the efficiency of the screen tends to zero, regardless of the gap width and frequency. This is due to the fact that short plates, regardless of the width of the gap, practically do not form a significant obstacle to the propagation of a sound wave.

The obtained dependences can be used in the engineering calculation of the parameters of lattice noise shields. With a given level of required noise reduction, it is possible to select a combination of plate length and gap width that provides both acoustic efficiency and the necessary blowout.

When designing and implementing ventilated noise screens of the lattice type, it is necessary to take into account not only the acoustic characteristics, but also the requirements for ensuring airflow. Since too narrow gaps between the screen elements can limit the necessary ventilation, the task of choosing the optimal configuration requires a balance between sound insulation and aerodynamics. These aspects go beyond the scope of this study and require separate consideration.

CONCLUSION

The acoustic efficiency of a grated noise shield is determined primarily by the ratio between the length of the plates and the width of the gap, and also depends on the frequency of the noise source. The maximum reduction of the sound pressure level — up to 20 dB is achieved with a plate length of 1.5–2.0 m and gaps of no more than 0.2 m, mainly in the frequency range of 250–1,000 Hz. A less noticeable but significant effect is also achieved with a plate length of 0.5–1.0 m and a gap between them of up to 0.2 m, reducing the sound pressure level to 10 dB. From a practical point of view, the configuration under consideration appears to be one of the most suitable for use.

With an increase in the gap width of more than 0.2 m, there is a marked decrease in the efficiency effect at all studied geometric mean frequencies.

The obtained graphical dependencies are recommended for use in selecting the optimal geometric configuration of the screen for specific operating conditions, taking into account its height.

REFERENCES

1. Shubin I.L., Tsukernikov I.E., Pisarski A. *Basics of designing transport noise barriers*. Moscow, Bastet, 2015; 208. (rus.).
2. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens. *Wave Motion*. 1986; 8(3):225–234. DOI: 10.1016/S0165-2125(86)80045-2
3. Komkin A.I., Nazarov G.M. Features of sound diffraction by a noise absorbing screen. *Acoustical Physics*. 2021; 67(3):303–307. DOI: 10.31857/S03207-91921030072. EDN DYPNGA. (rus.).
4. Komkin A.I., Musaeva R.N. Features of sound level reduction by T-shaped profile screens. *Acoustical Physics*. 2023; 69(6):756–764. DOI: 10.31857/S03207-91923600233. EDN CAFRCD. (rus.).
5. Urusovskii I.A. Sound diffraction by a barrier with a fan-shaped headpiece. *Acoustical Physics*. 2013; 59(1):86. DOI: 10.7868/S0320791912060135. EDN PNRSHJ. (rus.).

6. Voropayev S.I., Ovenden N.C., Fernando H.J.S., Donovan P.R. Finding optimal geometries for noise barrier tops using scaled experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017; 141(2):722-736. DOI: 10.1121/1.4974070
7. Dolger A.R., Kanev N.G. On the features of noise barrier design for broadband noise sources. *Acoustics of the habitat : Proceedings of the X All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists*. 2025; 147-154. (rus.).
8. Kanev N.G., Dolger A.R. Sound attenuation of louvered noise barriers for industrial equipment. *Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association (EuroNoise)*. 2025.
9. Dolger A.R. Effectiveness of louvered noise barriers: numerical modeling and shadow zone analysis. *Youth innovations : collection of articles from the VIII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists*. 2025; 50-56. (rus.).
10. Buzhinskiy K.V., Fiev K.P., Shashurin A.E., Lubianchenko A.A. Research into the feasibility of applying thermal covers to reduce the machinery noise. *Noise Theory and Practice*. 2020; 6(4):(22):135-147. EDN ADSJUO. (rus.).
11. Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V., Popov S.V. Lightweight sound-proof panels. *Noise Theory and Practice*. 2021; 7(2):(24):226-234. EDN XGAKUT. (rus.).
12. Ivanov N.I., Boiko I.S., Shashurin A.E. The problem of high-speed railway noise prediction and reduction. *Procedia Engineering*. 2017; 189:539-546. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.086
13. Chang L., Li X., Guo Z., Cao Y., Lu Y., Garziera R., Jiang H. On-demand tunable metamaterials design for noise attenuation with machine learning. *Materials & Design*. 2024; 238:112685. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112685
14. Romanov N.V., Pegin P.A. Modern designs of noise-proof screens. *Noise Theory and Practice*. 2022; 8(1):(28):17-28. EDN JQZBYP. (rus.).
15. Astrauskas T., Baltrėnas P., Januševičius T., Grubliauskas R. Louvred noise barrier for traffic noise reduction. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2021; 16(1):140-154. DOI: 10.7250/bjrbe.2021-16.519
16. He B., Xiao X.B., Zhou X., Han J., Jin X.S. Characteristics of Sound Insulation and Insertion Loss of Different Deloading Sound Barriers for High-Speed Railways. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2015; 345-352. DOI: 10.1007/978-3-662-44832-8_41
17. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental noise barriers. *Building Acoustics*. 2003; 10(4):289-323. DOI: 10.1260/135101003772776712
18. Mayak A.A., Kanev N.G. Evaluation of the effectiveness of noise shielding by a louvered barrier. *Acoustics of the habitat : Proceedings of the VIII All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists*. 2023; 197-201. EDN MFYYRY. (rus.).
19. Makarov O.I., Shanin A.V., Korol'kov A.I. Sommerfeld integral in acoustic wave diffraction problems using a triangular mesh. *Noise Theory and Practice*. 2023; 69(2):129-145. DOI: 10.31857/S0320791923600-105. EDN IULQGZ. (rus.).
20. Babich V.M., Lyalinov M.A., Grikurov V.E. *Sommerfeld – Malyuzhinets method in diffraction theory*. St. Petersburg, 2004; 93. EDN QJMUCZ. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Alexandr R. Dolger** — postgraduate student of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; a.dolger@yandex.ru;

Nikolay G. Kanev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of laboratory No. 42 “Acoustics of halls”; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 7695-4001, ID RSCI: 126777, Scopus: 6602609776, ResearcherID: ABE-5579-2020, ORCID: 0000-0001-6512-7131; nikolay.kanev@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexandr R. Dolger — creation of a computational model, performing calculations, analyzing results, conducting research, writing and formatting an article.

Nikolay G. Kanev — scientific guidance, formulation of the research concept and scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.451

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.4

Теоретико-методический подход к формированию опорных населенных пунктов для обеспечения сбалансированного устойчивого развития субъекта РФ

Альбина Ахмедовна Федоровская¹, Дарья Сергеевна Вышлова²

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Центр информационного обеспечения градостроительной деятельности (ЦИОГД);

г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Стратегией пространственного развития РФ до 2030 года с прогнозом до 2036 года развитие опорных населенных пунктов (ОНП) выдвинуто как одно из приоритетных. Несмотря на то, что на территории Российской Федерации уже выделено 2160 ОНП, задача по выбору наиболее приоритетных из них для обеспечения сбалансированного развития является актуальной. В связи с этим цель исследования — разработка методических основ формирования ОНП на территории субъекта РФ. В качестве объекта исследования рассматривается территория Ростовской области. Практическая значимость заключается в том, что результаты работы могут быть учтены при разработке концепции новой системы ОНП, а также при оптимизации разделов схемы территориального планирования. **Материалы и методы.** Разработаны методические основы формирования ОНП на территории субъекта РФ в целях пространственного развития территории субъекта РФ. Адаптирована методика комплексной оценки, включающая критерии относительной ценности для выбора территории, позволяющая определять ценность муниципального образования для последующего выбора ОНП на его территории.

Результаты. Демонстрируется методика определения ОНП субъекта РФ, разрабатывается матрица приоритетности факторов для оценки территории с целью присвоения статуса опорного населенному пункту субъекта РФ. В рамках реализации разработанного теоретико-методического инструментария представлены электронные карты комплексной оценки территории Ростовской области для формирования ОНП, рейтинг муниципальных районов, в которых могут быть выбраны приоритетные территории. Сформирована система расселения на примере ОНП Белая Калитва и прилегающих территорий к населенному пункту.

Выводы. Разработанный инструментарий предназначен для совершенствования научно-методической базы в области принятия решений об определении ОНП, выделения приоритетных для развития в условиях ограниченности материальных и временных ресурсов, а также нестабильности экономической ситуации. Методические основы характеризуются универсальностью по причине применения стандартных методов, но в новом сочетании и интерпретации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: опорный населенный пункт, стратегия, субъект РФ, оптимизация, сбалансированное развитие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федоровская А.А., Вышлова Д.С. Теоретико-методический подход к формированию опорных населенных пунктов для обеспечения сбалансированного устойчивого развития субъекта РФ // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.4

Автор, ответственный за переписку: Альбина Ахмедовна Федоровская, bina-87@mail.ru.

Theoretical and methodological approach to the formation of key settlements to ensure balanced sustainable development of a constituent entity of the Russian Federation

Albina A. Fedorovskaya¹, Daria S. Vyshlova²

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² Center for Information Support of Urban Development Activities; Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The Spatial Development Strategy of the Russian Federation until 2030 (with a forecast until 2036) has identified the development of key settlements (hereinafter referred as KS) as one of its priorities. Despite the fact that 2,160 KS have already been identified in the Russian Federation, the task of selecting the most priority ones to ensure balanced development remains relevant. Therefore, the purpose of this study is to develop methodological foundations for the formation of KS in the territory of the Russian Federation constituent entity.

Materials and methods. A comprehensive assessment methodology was adapted, including relative value criteria for the selection of territory, allowing the value of a municipal formation to be determined for the subsequent selection of the KS in its territory.

Results. A methodology for determining the KS of a constituent entity of the Russian Federation is demonstrated, and a matrix of priority factors for assessing a territory with the aim of assigning it the status of a key settlement of a constituent entity of the Russian Federation is being developed. As part of the implementation of the developed theoretical and methodological toolkit, presented electronic maps of the comprehensive assessment of the territory of the Rostov region. A settlement system was developed on the example of the village of Belaya Kalitva and the surrounding areas.

Conclusions. The developed toolkit is intended to improve the scientific and methodological framework for making decisions on determining the KS, highlighting priorities for development in the context of limited material and time resources, as well as the instability of the economic situation. The methodological framework is characterized by its universality due to the use of standard methods in a new combination and interpretation.

KEYWORDS: key settlement, strategy, constituent entity of the Russian Federation, optimization, balanced development

FOR CITATION: Fedorovskaya A.A., Vyshlova D.S. Theoretical and methodological approach to the formation of key settlements to ensure balanced sustainable development of a constituent entity of the Russian Federation. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.4

Corresponding author: Albina A. Fedorovskaya, bina-87@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года (далее — Стратегия)¹ в приоритетные направления входит развитие системы опорных населенных пунктов (ОНП). ОНП — это населенный пункт, обеспечивающий комфортную среду проживания для населения за счет доступности объектов социально-культурной инфраструктуры (образования и здравоохранения, культурного обслуживания) и других объектов экономики и хозяйственной деятельности. Ключевой особенностью ОНП является сочетание пространственных, природно-ресурсных, ландшафтных характеристик территорий с качеством городской среды для обеспечения комфортной жизни населения и прекращения оттока жителей из небольших городов и сельских поселений в крупные городские агломерации и мегаполисы [1–3].

Также в Стратегии утверждены 2160 ОНП в 89 субъектах РФ, которые представлены в перечне², включая новые регионы. В каждом субъекте РФ количество ОНП варьируется от 20 и выше, при этом существенно различаются типы выбранных населенных пунктов, а именно:

- город-ядро городской агломерации;

- город (населенный пункт), входящий в состав агломерации;
- наукоград;
- город, находящийся в составе закрытого административно-территориального образования;
- сельские поселения и др.

В условиях ограниченности материальных ресурсов для осуществления оптимального развития ОНП органам муниципальной и региональной власти, осуществляющим градостроительную политику, необходим инструментарий для формирования и выбора приоритетных населенных пунктов. Под приоритетными ОНП в данном исследовании подразумеваются населенные пункты, сбалансированное развитие которых должно проводиться в первую очередь исходя из совокупности их характеристик (социально-экономических, географических, природно-ландшафтных и инфраструктурных) и связности каркаса территориальной системы в целом [4–6]. Одновременно Распоряжением Правительства Российской Федерации от 23.12.2022 № 4132-р утверждены методические рекомендации по критериям для формирования ОНП и прилегающих территорий³. Данные методические рекомендации выделяют ряд критериев для ОНП, например:

- ОНП не может входить в состав городской агломерации;
- расстояние между ОНП и городом с численностью более 50 тыс. чел. должно быть более 50 км;
- численность населения ОНП должна быть от трех до 50 тыс. чел. (крупное село, поселок городского типа);

¹ Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года : Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2024 № 4146-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202501060001>

² Единый перечень опорных населенных пунктов Российской Федерации // Министерство экономического развития РФ. URL: trategicheskoe_planirovanie_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_s_prognozom_do_2036_goda/edinyy_perechen_opornyh_naselennyh_punktov_rf/

³ Об утверждении методических рекомендаций по критериям определения опорных населенных пунктов и прилегающих территорий : Распоряжение Правительства РФ от 23.12.2022 № 4132-р.

- более половины населения ОНП обеспечены социальной инфраструктурой (школы, детские сады, больницы, станции медицинской помощи и т.д.).

Анализ критериев из Методических рекомендаций³ позволяет сделать вывод о противоречии между существующими параметрами для выделения ОНП и перечнем [5], уже утвержденным в РФ. Согласно принятым методическим рекомендациям, ОНП может быть не просто поселком, а компактным населенным пунктом, равнозначным удаленным от крупных городов и не входящим в состав агломераций.

Цель исследования — разработка методических основ формирования ОНП на территории субъекта РФ.

Объектом исследования является субъект РФ — Ростовская область.

Зарубежный опыт

В 1933 г. немецкий географ В. Кристаллер [7] изложил свою «теорию центральных мест», отображающую иерархию городского расселения. В ее основе лежит подход к рассмотрению территории в виде сети населенных пунктов (центров), имеющих форму многоуровневых правильных гексагональных решеток (рис. 1), тип которых зависит от показателя K (число дополнительных районов следующего, более низкого уровня иерархии, подчиненных одному центральному месту данного уровня). В соответствии с теорией В. Кристаллера, центральные пункты одного уровня стремятся располагаться равномерно, на равном удалении друг от друга, формируя максимально компактную область обслуживания, идеализированная форма которой — круг.

Ограничения (недостатки) этого подхода:

- рассматриваемая территория должна быть однородной и безграничной с географической точки зрения;
- распределение жителей должно быть равномерным;
- населенные пункты и их территориальные ресурсы должны быть равноудалены друг от друга;

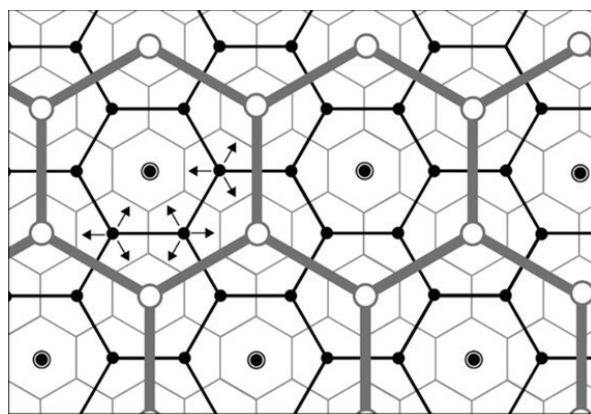


Рис. 1. Кристаллеровская решетка с $K = 3$: 1, 2, 3 — центральные места 1, 2 и 3-го уровней иерархии

- одинаковая покупательская способность населения в центрах.

Соответственно, стоит сделать вывод, что данная теория применима на маленьком масштабе для городов и населенных пунктов, находящихся в пределах территории, обладающей одинаковыми социальными, природно-ландшафтными, климатическими и экономическими характеристиками.

Отечественный опыт

В 1970-х гг. «теория центральных мест» вдохновила советских географов-экономистов Г.М. Лаппо, С.В. Хорева и других на создание концепции опорного каркаса расселения, предложенного для территории Сибири и Арктики. В основе концепции была идея создания сети населенных пунктов-центров, отвечающих за развитие прилегающих территорий с низкой плотностью освоения и застройки [8, 9]. В 90-е гг. прошлого века произошло смещение фокуса с опорного каркаса на крупные городские агломерации, что усилило асимметрию пространственных территориальных систем (субъектов РФ) и территориальный разрыв в обеспеченности комфортной средой населения на селе и в городе [10, 11]. Возрождение интереса к концепции ОНП произошло в начале 2020-х гг. Д.П. Соснин, Э. Маркварт и Н.Н. Киселёва провели подробный анализ «теории центральных мест» Вальтера Кристаллера и отметили, что современная немецкая законодательная база закрепляет принцип системы центральных мест как один из основополагающих элементов пространственной организации государства и может быть внедрена в настоящее время [12].

Анализ исследований перспектив развития ОНП в пространственной территориальной системе показал, что наиболее востребованные направления:

- развитие сельских территорий как агломераций и вовлечение средних и небольших поселений в крупные отраслевые и производственные структуры [13, 14];
- фокус на качестве условий для жизни и обеспечении доступной комфортной среды жизнедеятельности человека [15];
- вовлечение ОНП в туристический комплекс субъекта РФ, в особенности сельские поселения со сложившимся ландшафтом и экономической хозяйственной деятельностью [16];
- ликвидация разрыва и снижение диспропорций между городскими агломерациями и сельскими населенными пунктами в части обеспеченности жителей социальной, инженерной и транспортной инфраструктурой [17].

Все вышеизложенные направления развития ОНП требуют качественной системной проработки и анализа изначальных сложившихся условий на территории субъекта РФ, которая возможна только при применении современных методов и инструментов

(в том числе геоинформационных систем, методов математического моделирования и прочих) [18–22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

К методам, используемым в рамках исследования, относятся:

- сравнительный анализ и синтез исходной информации;
- метод взвешенных критериев;
- адаптированная методика комплексной оценки территории субъекта РФ;
- геопространственный анализ территории в среде ГИС.

Для оптимизации процесса выбора ОНП разработаны методические основы формирования опорных населенных пунктов на территории субъекта РФ. Данная методика состоит из этапов, представленных на рис. 2.

На первом этапе создается информационная база принятия решений, исходными для которой являются:

- схемы территориального планирования субъекта РФ;
- база нормативно-правовых актов сопровождения градостроительной политики развития сельских территорий;
- стратегия социально-экономического развития субъекта РФ;

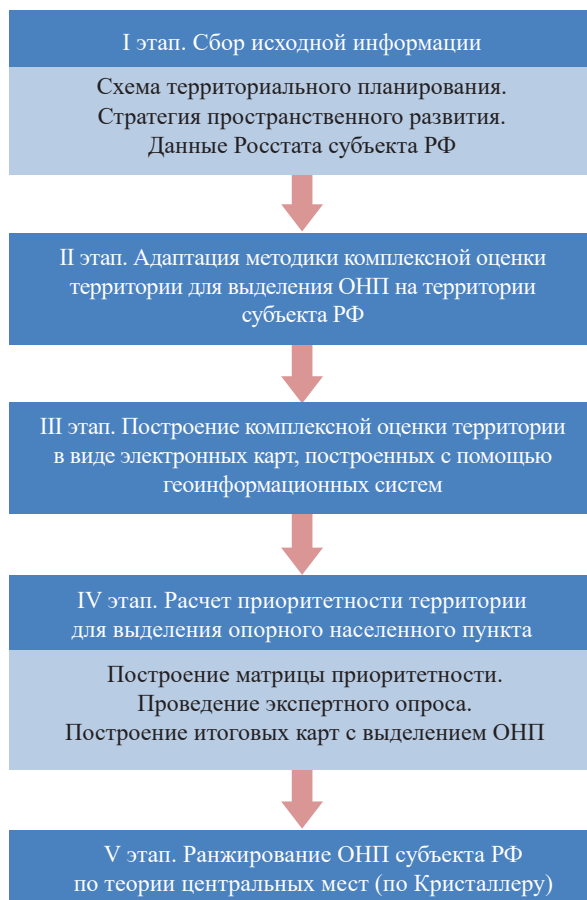


Рис. 2. Методические основы формирования ОНП на территории субъекта РФ

- статистические данные Росстата для территории субъекта РФ, собираемые для формирования критериев комплексной оценки территории.

На втором этапе производится адаптация методики комплексной оценки территории для оптимизации процесса выбора приоритетных ОНП в условиях сбалансированного развития субъекта РФ.

Впервые методика комплексной оценки территории была отражена в трудах С.И. Кабаковой [23] в 70-х гг. прошлого века, а затем у архитектора А.П. Ромма [24] и других ученых, использующих математические модели [25, 26].

Комплексная оценка территории [26] предполагает интегрированный подход к анализу территориального размещения и качественных характеристик всех видов ресурсов. Главным образом факторы распределяют по подсистемам:

- социальная подсистема;
- экономическая;
- пространственная;
- экологическая.

Методика комплексной оценки территории давно легла в оценку кадастровой стоимости земель для целей налогообложения [27–30]. На основе методики комплексной оценки территории были подобраны оценочные факторы населенных пунктов для последующего присвоения им статуса опорных. Факторы относительной ценности территории и баллы, согласно которым они оцениваются, приведены в табл. 1. Территория субъекта РФ разбивается на оценочные участки, как правило, выделяемые границами муниципальных образований, и оцениваются эти участки друг относительно друга от 0 до 1. Разнохарактерная информация систематизируется и структурируется с помощью инструмента — линейная интерполяция.

Третий этап заключается в представлении комплексной оценки территории в виде электронных карт с помощью геоинформационных систем. После адаптации методики комплексной оценки территории для цели присвоения населенному пункту статуса опорного следует построение карт по факторам относительной ценности муниципальных образований. Результатом этого этапа служит пространственная визуализация результатов оценки.

На четвертом этапе выполняется расчет приоритетности территории для выделения ОНП на основе факторов относительной ценности. Стадии этого этапа:

- 1) разработка матрицы приоритетности;
- 2) проведение опроса экспертов для определения коэффициентов значимости;
- 3) результатом этапа является построение итоговой карты с выделением ОНП.

Пятый этап — ранжирование выбранного ОНП согласно теории центральных мест. Выбранная территория рассматривается как сеть расселения по наиболее быстрому пути получения социально-бытовых услуг (по В. Кристаллеру).

Табл. 1. Факторы относительной ценности населенных пунктов

Подсистема	Фактор относительной ценности	Балл	Описание исходной информации — база оценки
Социальная	Численность населения	0–1	От 3 до 5 тыс. чел. (Росстат) и прогнозные данные [28]
	Наличие объектов амбулаторного лечения	0–1	Радиус доступности — 25 км (по карте OpenStreetMap, Yandex)
	Уровень развития сферы культурно-бытового обслуживания населения (медицинские учреждения, детсады, школы и прочие)	0–1	Степень насыщенности объектами социальной инфраструктуры и культуры (по карте OpenStreetMap, Yandex)
Пространственная	Транспортная обеспеченность	0–1	Расстояние от ОНП до ближайшего города или населенного пункта с численностью более 50 тыс. чел. составляет 50 км (по карте OpenStreetMap, Yandex)
	Состояние дорожной сети и обеспеченность дорогами	0–1	Отвечает или не отвечает нормативным требованиям по качеству покрытия (согласно данным, предоставляемым о дорожном комплексе, схема территориального планирования)
	Уровень инженерного обустройства территории (водоснабжение, канализация, теплоснабжение, электроснабжение, газоснабжение)	0–1	Количество проведенных мероприятий, связанных с улучшением качества инженерных сетей по каждому оцениваемому муниципальному образованию или городскому округу (отчеты по реализации государственных программ, схема территориального планирования)
Экологическая	Инженерно-геологические условия территории. Экзогенные геологические процессы (ЭГП). Засоление почв	0–1	От большей проявленности процессов к меньшей (данные на основе обработки результатов экологического мониторинга)
	Оценка лесных и водных ресурсов	0–1	Оценка данного фактора характеризует устойчивость урбоэколандшафта [29] и производится на основании сведений о площади водного и лесного фондов

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбрана Ростовская область. Поэтапная реализация методического инструментария представлена ниже.

Первый этап — сбор исходной информации: произведен анализ территориально-пространственной организации Ростовской области в рамках развития ОНП, методических рекомендаций и нормативно-правовых актов. Выявлены особенности инфраструктурного, пространственного развития, основных зон промышленных комплексов и уровень развития социальной инфраструктуры объектов культуры. Собранная информация систематизирована для дальнейшей ее трансформации в систему критериев комплексной оценки территории.

Второй этап — адаптация методики комплексной оценки территории для оптимизации процесса выбора приоритетных ОНП в условиях Ростовской области.

Стоит отметить, что в Ростовской области 55 муниципальных образований (далее — МО) и городские округа (далее — ГО). В соответствии с утвержденными методическими рекомендациями³, откорректирован список МО и ГО, входящих в расчет. Исключены из списка территории, которые официально входят в состав Ростовской агломерации:

- 1) городские округа: Ростов-на-Дону, Азов, Батайск, Новочеркасск, Таганрог;
- 2) муниципальные образования: Азовский муниципальный район, Аксайский муниципальный район (в том числе городское и сельские поселения), Мясниковский муниципальный район и Неклиновский муниципальный район.

В табл. 2–4 приведен подробный процесс описания одного из критериев «Состояние дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог» и механизм их оценки. Фактор — сложный.

В информацию, вносимую для оценки территории Ростовской области, входят два подфактора.

- 1. Обеспеченность территории сетью автомобильных дорог.
- 2. Состояние дорожной сети.

В табл. 2, 4 продемонстрирован пример по 10 МО из 44 оцениваемых, а в табл. 3 — по всем районам Ростовской области.

Информация о подфакторе 1 — обеспеченность территории сетью автомобильных дорог. Показатель обеспеченности из расчета на 1000 жителей в Ростовской области составляет 8,6 км. Плотность дорожной сети — 357 км/1000 км². Для Ростовской области характерно неравномерное распределение сети автомобильных дорог, уменьшение плотности дорог от крупных городских центров к периферии.

Районами с наиболее разветвленной сетью авто-дорог являются районы⁴:

- Азовский;
- Аксайский;
- Октябрьский;
- Семикаракорский.

Районы, недостаточно обеспеченные сетью авто-дорог⁴:

- Заветинский;
- Морозовский;
- Ремонтненский.

⁴ Дорожный комплекс // Официальный портал Правительства Ростовской области. URL: <https://www.donland.ru/activity/198/>

Табл. 2. Численное значение — обеспеченность территории сетью автомобильных дорог

Муниципальный район	Площадь, км ²	Протяженность, км	Плотность, на 100 км ² территории	Балл	Итог
Багаевский район	950,6	Федеральная	0,00	0	0,47
		Региональная = 77,62	8,17	0,18	
		Межмуниципальная = 72,1	7,58	0,29	
Белокалитвинский район	2649,8	Федеральная = 40 (М21)	1,51	0,12	0,32
		Региональная = 48,7	1,84	0,04	
		Межмуниципальная = 109,5	4,13	0,16	
Боковский район	1927	Федеральная	0,00	0	0,18
		Региональная = 106,1	5,51	0,12	
		Межмуниципальная = 29,6	1,54	0,06	
Верхнедонской район	2675	Федеральная	0,00	0	0,2
		Региональная = 98,6	3,69	0,08	
		Межмуниципальная = 78,95	2,95	0,12	
Веселовский район	1355	Федеральная	0,00	0	0,19
		Региональная = 89,24	6,59	0,14	
		Межмуниципальная = 18,6	1,37	0,05	
Волгодонской район	1479	Федеральная	0,00	0	0,28
		Региональная = 102,51	6,93	0,15	
		Межмуниципальная = 49,4	3,34	0,13	
Дубовский район	3997,09	Федеральная	0,00	0	0,18
		Региональная = 99,5	2,49	0,05	
		Межмуниципальная = 136,77	3,42	0,13	
Егорлыкский район	1460	Федеральная	0,00	0	0,32
		Региональная = 100,09	6,86	0,15	
		Межмуниципальная = 61,45	4,21	0,17	
Заветинский район	4694,56	Федеральная	0,00	0	0,14
		Региональная = 38,6	0,82	0,01	
		Межмуниципальная = 151,55	3,23	0,13	
Зерноградский район	2663	Федеральная	0,00	0	0,14
		Региональная = 127,01	4,77	0,1	
		Межмуниципальная = 87,4	3,28	0,13	

Табл. 3. Расчетный суммарный балл подфактора состояние дорожной сети

Муниципальный район	Наиболее разветвленной сетью дорог характеризуются	0–0,33	Состояние дорожной сети				Общий балл
			Приведены в нормативное состояние	0–0,33	Дорожные сети, отвечающие нормативным требованиям	0–0,33	
Багаевский	1	0,33	0,5	0,17	0	0,00	0,50
Белокалитвинский	1	0,33	0,5	0,17	0	0,00	0,50
Верхнедонской	0,25	0,08	0	0,00	1	0,33	0,41
Егорлыкский	0,5	0,17	0	0,00	0,5	0,17	0,33
Заветинский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Зерноградский	0	0,00	0,5	0,17	0	0,00	0,17
Константиновский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Красносулинский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Матвеево-Курганский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Морозовский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Октябрьский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Пролетарский	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
Ремонтненский	0,25	0,08	0,5	0,17	0	0,00	0,25
Сальский	1	0,33	0,5	0,17	0	0,00	0,50
Семикаракорский	0,25	0,08	0	0,00	1	0,33	0,41
Советский	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
Усть-Донецкий	0,25	0,08	0	0,00	1	0,33	0,41
Целинский	1	0,33	0	0,00	0	0,00	0,33
Остальные районы РО	0,25	0,08	0	0,00	1	0,33	0,41

По результатам проведенной оценки плотности автомобильных дорог осуществлены интерполяция значений и приведение их в виде оценки в баллах от 0 до 1 (см. табл. 2).

Числовая выраженность каждого подфактора принимается в следующих пределах:

- уровень плотности федеральных дорог — 0–0,4;
- уровень плотности региональных дорог — 0–0,3;
- уровень плотности межмуниципальных дорог — 0–0,3.

Показатель относительной значимости территорий городских округов Ростовской области равен 1, так как они выполняют роль основных транспортных узлов региона.

Подфактор 2 — состояние дорожной сети оценивает качество покрытия дорожной сети, не отвечающее нормативным требованиям. Районы, где часть дорог приведена в нормативное состояние, оценивается в 0,5 баллов при наличии этих улучшений. В рамках оценки составлена таблица градации баллов, согласно которой каждому району присваивается балл по трем показателям в зависимости

от состояния дорожной сети и обеспеченности такими сетями (табл. 3).

За 2024 г. из 344 муниципальных объектов досрочно приведены в нормативное состояние 98 участков улично-дорожной сети в Азовском, Аксайском, Верхнедонском, Зерноградском, Егорлыкском, Константиновском, Красносулинском, Матвеево-Курганском, Неклиновском, Октябрьском, Усть-Донецком, Целинском районах и городах: Азов, Батыйск и Ростов-на-Дону.

Вместе с тем в муниципальных образованиях существует ряд нерешенных вопросов, один из которых — доля дорог, не отвечающих нормативным требованиям. Так, данный показатель в среднем по области составляет 41,5 % или 11,4 тыс. км дорог (из 27,7 тыс. км). Наиболее остро проблема с дорогами, не отвечающими нормативным требованиям, стоит в Советском сельском районе — 68,9 %, Пролетарском районе — 65,8 %, г. Таганроге — 64 %, г. Шахты — 63,2 %, Багаевском районе — 54,9 %, Сальском районе — 53,8 %⁴. После обработки результатов анализа современного состояния дорожного полотна в Ростовской области информация представлена в табл. 3. В табл. 4 обобщены два подфактора и произведен расчет итоговых значений

Табл. 4. Числовая выраженность фактора состояния дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог по 10 муниципальным образованиям

Муниципальный район	Подфактор — состояние дорожной сети	0–0,5	Подфактор — обеспеченность территории сетью автомобильных дорог	0–0,5	Результирующий балл
Багаевский	0,50	0,25	0,47	0,24	0,5
Белокалитвинский	0,50	0,25	0,32	0,16	0,4
Боковский	0,41	0,21	0,18	0,09	0,3
Верхнедонской	0,41	0,21	0,2	0,10	0,3
Веселовский	0,41	0,21	0,19	0,10	0,3
Волгодонской	0,41	0,21	0,28	0,14	0,3
Дубовский	0,41	0,21	0,18	0,09	0,3
Егорлыкский	0,33	0,17	0,32	0,16	0,3
Заветинский	0,25	0,12	0,14	0,07	0,2
Зерноградский	0,17	0,08	0,14	0,07	0,2

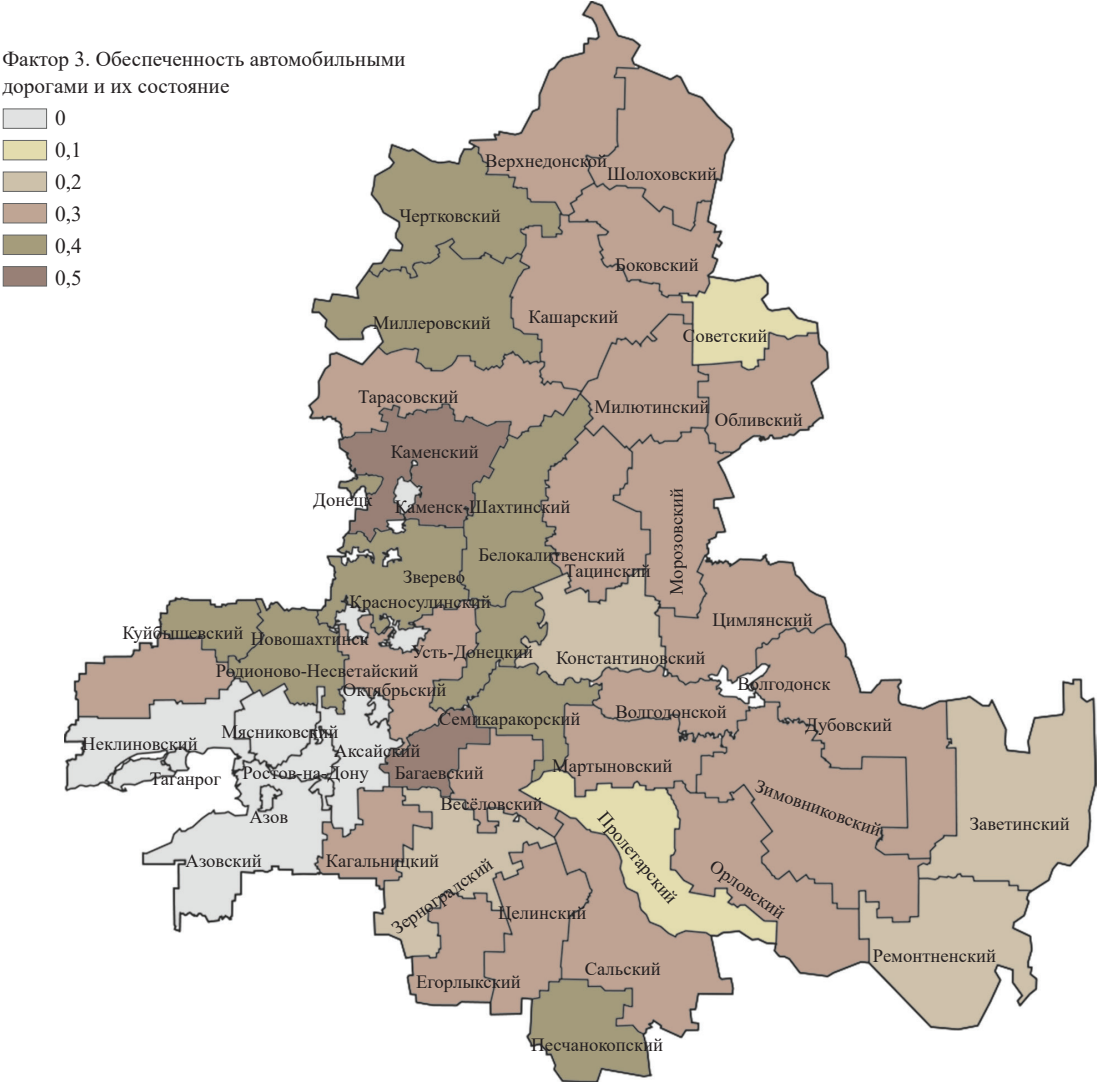


Рис. 3. Электронная карта комплексной оценки территории Ростовской области по фактору «Состояние дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог»

Табл. 5. Матрица приоритетности факторов для оценки территории для выбора ОНП

Функцио- нальное назначение	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
ОНП	1. Численность населения	2. Зона радиуса транспортной доступности	3. Состояние дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог	4. Наличие объектов амбулаторного лечения	5. Уровень инженерного обустройства территории	6. Инженерно-геологические условия территории	7. Уровень развития сферы культурно-бытового обслуживания населения	8. Оценка лесных и водных ресурсов
k	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8

фактора «Состояние дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог».

Третий этап — формирование восьми тематических карт по факторам комплексной оценки.

Из-за того, что некоторые факторы комплексной оценки составные, необходимо было построить сначала карты, соответствующие их подфакторам, а затем построить результирующую карту. В каче-

стве примера представлена карта «Состояние дорожной сети и обеспеченность территории сетью автомобильных дорог» (рис. 3).

На четвертом этапе производится расчет приоритетности территории для выбора ОНП.

Построение матрицы приоритетности основывается на определении коэффициентов значимости каждого фактора комплексной оценки для выделения ОНП (табл. 5).

Расчет коэффициентов значимости факторов относительной ценности для присвоения населенному пункту статуса опорного проводился с помощью метода экспертного опроса. Четыре эксперта заполняли опросные листы, в результате обработки которых матрица приоритетности приобретает вид, показанный в табл. 6.

Зависимость уровня влияния факторов на присвоение опорному населенному пункту статуса опорного можно представить в виде функции:

$$B_{\text{мо}} = \sum F_i \cdot K_i^j = F_1 \cdot k_1 + F_2 \cdot k_2 + F_3 \cdot k_3 + F_4 \cdot k_4 + F_5 \cdot k_5 + F_6 \cdot k_6 + F_7 \cdot k_7 + F_8 \cdot k_8,$$

где $B_{\text{мо}}$ — показатель ценности муниципального образования для присвоения населенному пункту статуса опорного; F_i — i -й коэффициент относительной ценности территории; K_i — коэффициент значимости i -го фактора.

Распределение рейтинга факторов приоритетности с посчитанным показателем ценности территории для каждого района представлено на рис. 4.

Чтобы выявить самые перспективные районы для развития населенных пунктов в роли опорных,

Табл. 6. Матрица приоритетности факторов для оценки территории для выбора ОНП после обработки анкет экспертного опроса

ОНП	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
Член экспертной комиссии № 1	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Член экспертной комиссии № 2	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	0,25
Член экспертной комиссии № 3	1	1	1	1	0,5	0,25	0,5	0,5
Член экспертной комиссии № 4	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,25
Средний коэффициент	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,4	0,6	0,4

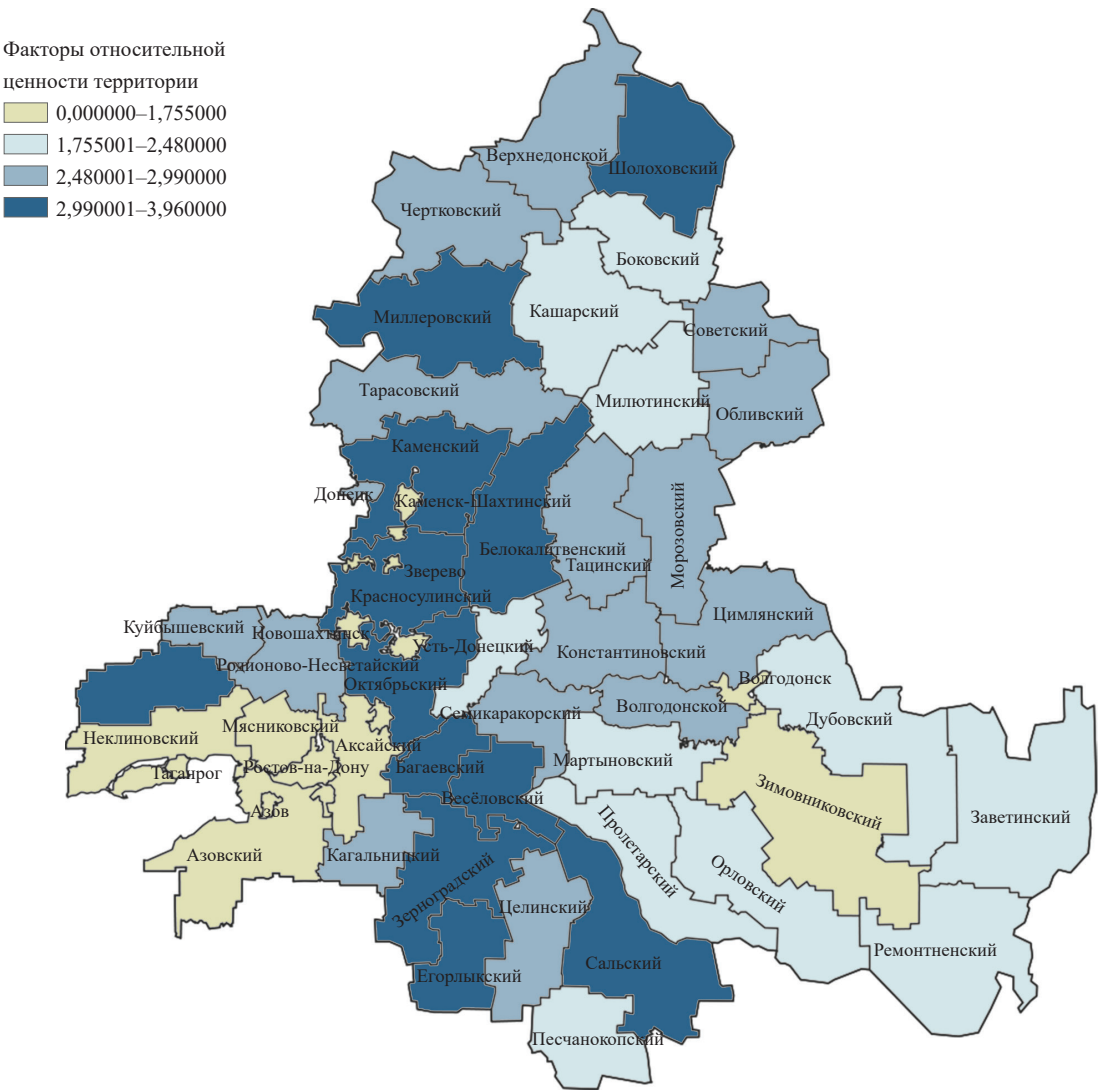


Рис. 4. Электронная карта распределения рейтинга функциональной приоритетности территории для выбора ОНП

осуществлено ранжирование итогов всесторонней оценки территории Ростовской области (табл. 7).

Наиболее приоритетными согласно комплексной оценке Ростовской области для создания ОНП являются: Багаевский, Белокалитвинский, Весе-

Табл. 7. Ранжирование результатов комплексной оценки территории Ростовской области для определения ОНП

Показатель ценности территории	Уровень потенциала для развития ОНП
1,755–2,480	Низкий
2,505–2,990	Средний
3,035–3,960	Высокий

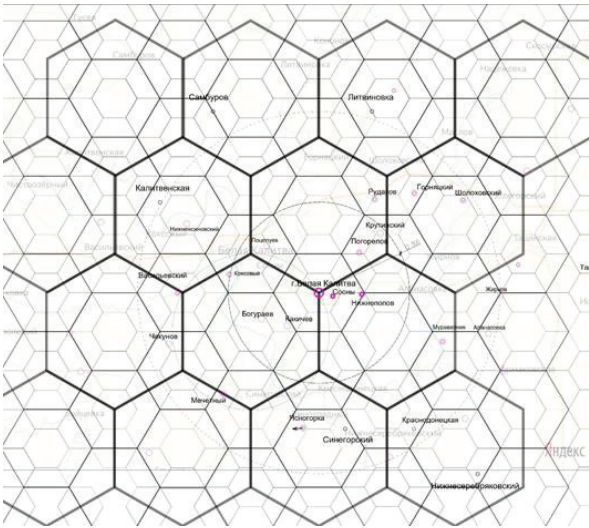


Рис. 5. Сеть в виде гексагональной решетки с числом дополнительных районов следующего более низкого уровня иерархии, где центральное место первого порядка — г. Белая Калитва

Табл. 8. Результаты распределения населенных пунктов по уровням иерархии, согласно решетке Кристаллера

Уровень порядка населенного пункта	Существующие населенные пункты, располагающиеся в узлах решетки	Населенные пункты, которые могут находиться на другом уровне иерархии
1-го порядка	г. Белая Калитва; хутор Нижнесеребряковский; станция Калитвенская	станция Краснодонецкая; пос. Жирнов (относится к Тацинскому району); хутор Васильевский; пос. городского типа Шолоховский
2-го порядка	хутор Самбуrow; с. Литвиновка; пос. Синегорский	хутор Рудаков; пос. Горняцкий; хутор Погорелов; хутор Нижнепопов; хутор Муравейник; пос. Ясногорка; хутор Мечетный; хутор Какичев; пос. Коксовый

ловский, Егорлыкский, Зерноградский, Каменский, Красносулинский, Миллеровский, Октябрьский, Сальский, Шолоховский районы.

Заключительный пятый этап — ранжирование ОНП субъекта РФ по теории центральных мест. В качестве примера выберем муниципальный район, у которого показатель ценности территории максимальный, а именно Белокалитвинский район (3,960 по показателю приоритетности).

Белую Калитву следует рассматривать как ОНП первого порядка. Населенные пункты первого порядка образуются на пересечении самой крупной гексагональной решетки. При назначении Белой Калитвы пунктом 1-го порядка город становится центральным пунктом («центром высшего порядка»), обеспечивающим население разнообразием услуг и товаров наивысшего уровня сложности (например, специализированная медицина, высшее образование, культурные учреждения).

Центрами второго порядка служат населенные пункты, располагающиеся на пересечении гексагональной решетки второго порядка. Это меньшие города или поселки, расположенные поблизости от Белой Калитвы. Они предоставляют базовые услуги (школы, поликлиники, магазины первой необходимости), ориентированы на обслуживание близлежащих сельских районов и пригородов.

Радиус окружности, внутри которой строится 1 сота второго порядка, составляет 7 км. Сеть в виде гексагональной решетки с числом дополнительных районов следующего 2-го уровня иерархии, где центральное место первого порядка — г. Белая Калитва, представлена на рис. 5.

В табл. 8 представлены населенные пункты, являющиеся центрами 1-го и 2-го порядка, а также те, которые могут считаться таковыми при изменении гексагональной решетки для обеспечения сба-

лансированного развития при формировании и оптимизации сети ОНП [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках представленного исследования разработана методика, позволяющая оптимизировать процесс территориального планирования на уровне субъекта РФ. В условиях ограниченности ресурсов (временных и материальных) развитие ОНП должно быть стратегически верным как с точки зрения существующего развития территории, так и с точки зрения будущих изменений для каждого региона. Целевое развитие и выбор населенных пунктов, приоритетных для развития в качестве ОНП, возможно только при структурном системном подходе, декомпозиции существующих условий в виде критериев на региональном уровне, отображающих достаточность ресурсов и потенциала этих территорий.

Разработанный теоретико-методический инструментарий позволяет осуществлять выбор оптимальных населенных пунктов в качестве «опорных», однако необходимо его развивать дальше на уровне детальной оценки каждого ОНП с точки зрения:

- комфортной городской среды;
- обеспечения населения необходимой инфраструктурой (как социальной, бытовой, так и транспортной);
- формирования устойчивой экономической системы, мест приложения труда и т.д.

Предложенная методика является универсальной и может быть применена при принятии решений органами муниципальной власти в части распределения материальных ресурсов при развитии ОНП, именно в части первоочередного выбора таких территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Евлампијева Е.В.* Опорные населенные пункты в условиях пространственного развития Российской Федерации // Бизнес. Образование. Право. 2025. № 2 (71). С. 147–152. DOI: 10.25683/VOLBI.2025.71.1315. EDN OXYXND.
2. *Нефедова Т.Г., Глезер О.Б.* Трансформация социально-географического пространства России // Вызовы и политика пространственного развития России в XXI веке. 2020. С. 214–251. EDN FSZDAW.
3. *Цыренов Д.Д., Савельев С.А.* Основные этапы формирования теорий регионального и территориального развития // Наукосфера. 2024. № 6–2. С. 454–459. DOI: 10.5281/zenodo.12645126. EDN ETLCZD.
4. *Гамидуллаева Л.А., Грошева Е.С., Белогорова О.А., Шевченко Д.Н.* Сбалансированное развитие территории: подходы к определению и оценке // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 3 (43). С. 25–41. DOI: 10.21685/2227-8486-2022-3-2. EDN WJKLDE.
5. *Korobov V.B., Kochurov B.I., Lokhov A.S., Tutygin A.G.* Geographical Objects as Systems: Adequate Properties and Functions // Geography and Natural Resources. 2023. Vol. 44. Issue 4. Pp. 306–313. DOI: 10.1134/s187537282304008x
6. *Korobeinikova A., Danilina N., Teplova I.* Planning Public Space Climate Comfortability: A GIS-Based Algorithm for the Compact Cities of the Far North // Land. 2024. Vol. 13. Issue 11. P. 1763. DOI 10.3390/land13111763
7. *Кристаллер В.* Как я пришел к теории центральных мест: рассказ о том, как может возникнуть теория и как в моем случае она возникла // Городские исследования и практики. 2024. Т. 9. № 1. С. 6–14. DOI: 10.17323/usp9120246-14. EDN DZLDJY.
8. *Ланно Г.М.* Концепция опорного каркаса территориальной структуры народного хозяйства: развитие, теоретическое и практическое значение // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. 1983. № 5. С. 16–28. EDN JDSFWA.
9. *Хорев Б.С.* Территориальная организация общества: (актуальные проблемы регионального управления и планирования в СССР). М. : Мысль, 1981. 320 с.
10. *Ёлишина А.А.* Городские агломерации: теоретические проблемы и анализ зарубежного опыта // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7-3 (51). С. 53–59. EDN UHWIBV.
11. *Садковская О.Е.* Асимметрия системы расселения Ростовской области — постановка проблемы // Архитектура и современные информационные технологии. 2025. № 1 (70). С. 158–172. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-158-172. EDN OHQYEH.
12. *Маркварт Э., Киселева Н.Н., Соснин Д.П.* Система опорных населенных пунктов как механизм управления пространственным развитием: теоретические и практические аспекты // Власть. 2022. Т. 30. № 2. С. 95–111. DOI: 10.31171/vlast.v30i2.8939. EDN UNFDYM.
13. *Рой О.М., Бичун В.С.* Опорные населенные пункты в условиях новой пространственной стратегии России // Муниципальная академия. 2025. № 3. С. 81–89. DOI: 10.52176/2304831X_2025_03_81. EDN PDPOLU.
14. *Артемова Е.И., Плотникова Е.В., Липтра Е.Н.* Опорные населенные пункты как институт комплексного развития сельских территорий // Международный сельскохозяйственный журнал. 2025. № 2 (404). С. 169–173. DOI: 10.55186/25876740_2025_68_2_169. EDN LSDTBR.
15. *Артемова О.В.* Проектный подход к управлению качеством городской среды: поиск новых возможностей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2025. Т. 19. № 2. С. 29–40. DOI: 10.14529/em250203. EDN SPQQAM.
16. *Пекуровский Д.А., Концевая С.Ю.* Тенденции пространственных изменений сельских территорий // Аграрная наука. 2023. № 3. С. 128–131. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-368-3-128-131. EDN SDIEJE.
17. *Евсюкова Т.Г., Симановский Н.А.* Социальная инфраструктура сельских территорий: состояние и перспективы развития // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 8 (126). С. 213–221. DOI: 10.33938/258-213. EDN XYLPWS.
18. *Берендеева А.Б., Рычихина Н.С.* Устойчивое развитие и ESG-трансформация малых городов: теории, концепции, подходы // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2025. № 2 (64). С. 71–82. DOI: 10.6060/ivcofin.2025642.724. EDN HJSGZK.
19. *Садковская О.Е.* «Новая градостроительная политика» на территории Ростовской области // Архитектон: известия вузов. 2023. № 4 (84). DOI: 10.47055/19904126_2023_4(84)_13. EDN VEYCRJ.
20. *Глигич-Золотарева М.В.* Стратегия пространственного развития Российской Федерации: новые подходы // Проблемы современной экономики. 2024. № 4 (92). С. 10–13. EDN RMMYGG.
21. *Махмудов Р.К., Эширов В.М., Черкасов А.А., Турун П.П., Луценко Д.А.* ГИС-моделирование локальных систем расселения Буденновского муниципального округа Ставропольского края // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 10. С. 29–38. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-29-38. EDN WAZOH1.

22. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Темкин И.О., Храмов В.В. Идентификация объектов геопространственных социотехнических систем. М. : ООО «Издательский центр РИОР», 2024. 186 с. DOI: 10.29039/02146-0. EDN JDRINK.

23. Медведева Л.С., Землякова Н.С. Диагности-ка социально-демографической безопасности регио-на // Научный альманах стран Причерноморья. 2025. Т. 11. № 1. С. 13–21. DOI: 10.23947/2414-1143-2025-11-1-13-21. EDN UWITRF.

24. Кабакова С.И. Градостроительная оценка территории городов. М. : Стройиздат, 1971. 153 с.

25. Ромм А.П. Математико-модельные основы комплексной оценки и функционального зонирова-ния городских территорий // Вопросы оценки. 1997. № 4. С. 2–11. EDN ONZNRH.

26. Бакаева Н.В., Черняева И.В. Принципы оценки эффективности градостроительной деятель-ности в России // Экономика строительства и при-родопользования. 2022. № 1–2 (82–83). С. 134–144. EDN IPPQYK.

27. Федоровская А.А., Гладышева О.Д. Имита-ционная модель оценки влияния объектов возобнов-ляемой энергетики на экологическое состояние субъ-екта РФ // Современные тенденции в строительстве,

градостроительстве и планировке территорий. 2024. Т. 3. № 3. С. 49–60. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-3-49-60. EDN EOFJCQ.

28. Иоселиани Н.А. Методические подходы к оценочному зонированию для целей государствен-ной кадастровой оценки // Имущественные отно-шения в Российской Федерации. 2018. № 7 (202). С. 41–49. DOI: 10.24411/2072-4098-2018-17002. EDN XTUGOL.

29. Шеина С.Г., Умнякова Н.П., Зильберо-ва И.Ю., Федоровская А.А., Гиря Л.В., Хоренков С.В. и др. Устойчивое развитие строительной отрасли с учетом климатических изменений. Ростов-на-Дону : Донской государственный технический универси-тет, 2024. 160 с. EDN VCPGST.

30. Ермолаева С.В., Кочуров Б.И. Природно-ландшафтная дифференциация и природная устойчи-вость экосистем региона // Экология урбанизирован-ных территорий. 2024. № 1. С. 23–30. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-23-30. EDN DFATAS.

31. Герцберг Л.Я. На пути к сбалансированно-му пространственному развитию Российской Феде-рации // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 1. С. 122–130. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-122-130. EDN UYUKFD.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Альбина Ахмедовна Федоровская — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры городского строительства и хозяйства; Донской государственный технический университет (ДГТУ); 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; bina-87@mail.ru;

Дарья Сергеевна Вышлова — главный специалист; Центр информационного обеспечения градострои-тельной деятельности (ЦИОГД); 344006, г. Ростов-на-Дону, пр-т Ворошиловский, д. 12; dariavyshlova@mail.ru.

Вклад авторов:

Федоровская А.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, формирование плана исследования, итоговые выводы.

Вышлова Д.С. — анализ литературных источников, обработка статистической информации, расчеты, оформление результатов исследования, формирование электронных карт, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

According to the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast to 2036 (hereinafter referred to as the Strategy)¹, one of the priority areas is the develop-ment of a system of key settlements (KS). A KS is a set-tlement that provides a comfortable living environment

for the population through the availability of social and cultural infrastructure (education and healthcare, cultural services) and other economic and commer-cial facilities. A key feature of KS is the combination of spatial, natural resource and landscape characteris-tics of territories with the quality of the urban environ-ment to ensure a comfortable life for the population and to stop the outflow of residents from small towns and rural settlements to large urban agglomerations and megacities [1–3].

The Strategy also approves 2,160 KS in 89 con-stituent entities of the Russian Federation, which are

¹ The approval of the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2036: Order of the Government of the Russian Federation No. 4146-r dated 28 December 2024. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202501060001>

listed in the appendix², including new regions. In each constituent entity of the Russian Federation, the number of KS varies from 20 and above, with significant differences in the types of settlements selected, namely:

- core city of an urban agglomeration;
- a city (settlement) that is part of an agglomeration;
- a science city;
- a city that is part of a closed administrative-territorial entity;
- rural settlements, etc.

Given the limited material resources available for the optimal development of KS, municipal and regional authorities responsible for urban development policy need tools for identifying and selecting priority settlements. In this study, priority settlements are understood to be settlements whose balanced development should be carried out primarily on the basis of their combined characteristics (socio-economic, geographical, natural landscape and infrastructure) and the connectivity of the territorial system as a whole [4–6]. At the same time, Decree No. 4132-r of the Government of the Russian Federation dated 23 December 2022 approved methodological recommendations on the criteria for the formation of KS and adjacent territories³. These methodological recommendations highlight a number of criteria for KS, for example:

- the KS cannot be part of an urban agglomeration;
- the distance between the KS and a city with a population of more than 50,000 must be more than 50 km;
- the population of the KS must be between 3,000 and 50,000 (large village, urban-type settlement);
- more than half of the population of the KS must have access to social infrastructure (schools, kindergartens, hospitals, medical aid stations, etc.).

An analysis of the criteria from the Methodological Recommendations³ leads to the conclusion that there is a contradiction between the existing parameters for identifying KS and the list [5] already approved in the Russian Federation. According to the adopted methodological recommendations, a KS may not be just a settlement, but a compact populated area, equidistant from large cities and not part of agglomerations.

The purpose of the study is to develop methodological guidelines for the formation of KS on the territory of a constituent entity of the Russian Federation.

The object of the study is the constituent entity of the Russian Federation — the Rostov Region.

² Unified list of key settlements of the Russian Federation, Ministry of Economic Development of the Russian Federation. URL: strategicheskoe_planirovanie_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_c_prognozom_do_2036_goda/edinyy_perechen_opornyh_naselennykh_punktov_rf

³ The approval of methodological recommendations on criteria for determining key settlements and adjacent territories: Order of the Government of the Russian Federation No. 4132-r dated 23 December 2022.

Foreign experience

In 1933, German geographer W. Christaller [7] presented his “theory of central places,” which reflects the hierarchy of urban settlement. It is based on an approach to viewing territory as a network of settlements (centres) in the form of multi-level regular hexagonal grids (Fig. 1), the type of which depends on the K index (the number of additional areas of the next, lower level of the hierarchy subordinate to one central place of a given level). According to W. Christaller’s theory, central points of the same level tend to be located evenly, at equal distances from each other, forming the most compact service area possible, the idealized form of which is a circle.

Limitations (disadvantages) of this approach:

- the territory under consideration must be homogeneous and boundless from a geographical point of view;
- the distribution of residents must be uniform;
- settlements and their territorial resources must be equidistant from each other;
- the purchasing power of the population in the centres must be the same.

Accordingly, it can be concluded that this theory is applicable on a small scale to cities and settlements located within a territory with the same social, natural landscape, climatic and economic characteristics.

Domestic experience

In the 1970s, the “theory of central places” inspired Soviet geographers and economists G.M. Lappo, S.V. Khorev, and others to create a concept of a settlement framework proposed for Siberia and the Arctic. The concept was based on the idea of creating a network of population centres responsible for the development of adjacent areas with low density of development and construction [8, 9]. In the 1990s, the focus shifted from the support framework to large urban agglomerations, which exacerbated the asymmetry of spatial territorial systems (subjects of the Russian Federation) and the territorial gap in the provision of a comfortable environment for the population in rural and urban areas [10, 11]. Interest in the KS concept was revived in the ear-

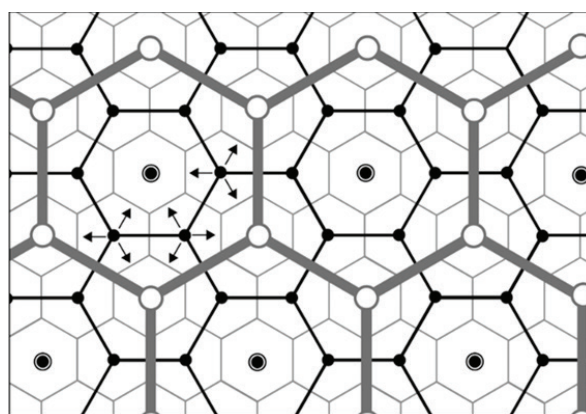


Fig. 1. Krystallov lattice with $K = 3$: 1, 2, 3 — central points of the 1st, 2nd, and 3rd levels of the hierarchy

ly 2020s. D.P. Sosnin, E. Markvart and N.N. Kiseleva conducted a detailed analysis of Walter Christaller’s “theory of central places” and noted that the modern German legislative framework enshrines the principle of the system of central places as one of the fundamental elements of the spatial organization of the state and can be implemented at present [12].

An analysis of studies on the prospects for the development of KS in the spatial territorial system showed that the most sought-after areas are:

- the development of rural areas as agglomerations and the involvement of medium and small settlements in large industrial and production structures [13, 14];
- focus on the quality of living conditions and ensuring an accessible and comfortable environment for human life [15];
- involvement of KS in the tourist complex of the constituent entity of the Russian Federation, especially rural settlements with an established landscape and economic activity [16];
- eliminating the gap and reducing disparities between urban agglomerations and rural settlements in terms of providing residents with social, engineering and transport infrastructure [17].

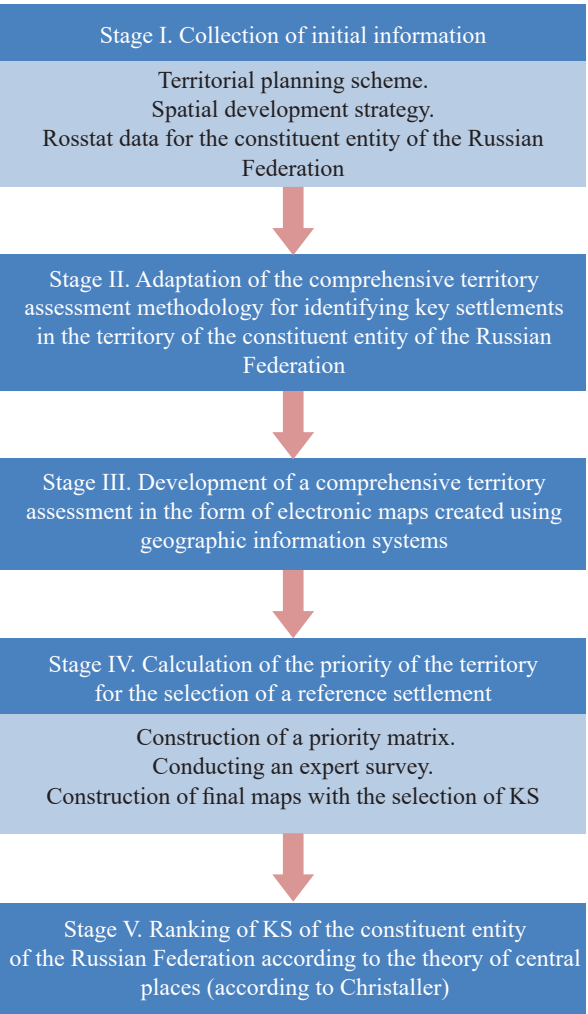


Fig. 2. Methodological foundations for the formation of KS in the territory of a constituent entity of the Russian Federation

All of the above areas of development of the KS require high-quality systematic study and analysis of the initial conditions in the territory of the Russian Federation, which is only possible with the use of modern methods and tools (including geographic information systems, mathematical modelling methods, and others) [18–22].

MATERIALS AND METHODS

The methods used in the study include:

- comparative analysis and synthesis of source information;
- weighted criteria method;
- adapted methodology for comprehensive assessment of the territory of a constituent entity of the Russian Federation;
- geospatial analysis of the territory in a GIS environment.

To optimize the process of selecting KS, methodological guidelines for the formation of reference settlements in the territory of a constituent entity of the Russian Federation have been developed. This methodology consists of the stages shown in Fig. 2.

The first stage involves creating an information base for decision-making, based on the following sources:

- territorial planning schemes for the constituent entity of the Russian Federation;
- a database of regulatory and legal acts supporting urban development policy for rural areas;
- the socio-economic development strategy for the constituent entity of the Russian Federation;
- Rosstat statistical data for the territory of the constituent entity of the Russian Federation, collected to form criteria for a comprehensive assessment of the territory.

At the second stage, the methodology for a comprehensive assessment of the territory is adapted to optimize the process of selecting priority KS in the context of the balanced development of the constituent entity of the Russian Federation.

The methodology for comprehensive assessment of territories was first described in the works of S.I. Kabakova [23] in the 1970s, and then by architect A.P. Romm [24] and other scientists using mathematical models [25, 26].

Comprehensive assessment of a territory [26] involves an integrated approach to analysing the territorial distribution and qualitative characteristics of all types of resources. The factors are mainly distributed across subsystems:

- social subsystem;
- economic subsystem;
- spatial subsystem;
- ecological subsystem.

The methodology for comprehensive assessment of territory has long been used in assessing the cadastral value of land for taxation purposes [27–30]. Based on the methodology for comprehensive assessment of territory, assessment factors for settlements

Table 1. Factors affecting the relative value of settlements

Subsystem	Relative value factor	Score	Description of source information — basis for assessment
Social	Population	0–1	From 3,000 to 5,000 people (Rosstat) and forecast data [28]
	Availability of outpatient treatment facilities	0–1	Accessibility radius — 25 km (according to OpenStreetMap, Yandex)
	Level of development of cultural and social services for the population (medical facilities, kindergartens, schools, etc.)	0–1	Degree of saturation with social infrastructure and cultural facilities (according to OpenStreetMap, Yandex)
Spatial	Transportation provision	0–1	The distance from the KS to the nearest city or settlement with a population of over 50,000 is 50 km (according to OpenStreetMap and Yandex maps)
	Condition of the road network and road coverage	0–1	Meets or does not meet regulatory requirements for pavement quality (according to data provided on the road complex, territorial planning scheme)
	Level of engineering infrastructure development in the area (water supply, sewerage, heat supply, electricity supply, gas supply)	0–1	Number of measures taken to improve the quality of engineering networks for each municipal entity or urban district assessed (reports on the implementation of state programmes, territorial planning scheme)
Ecological	Engineering-geological conditions of the territory. Exogenous geological processes (EGP). Soil salinization	0–1	From greater manifestation of processes to lesser manifestation (data based on processing of environmental monitoring results)
	Assessment of forest and water resources	0–1	The assessment of this factor characterises the sustainability of the urban landscape [29] and is based on information about the area of water and forest resources

were selected for subsequent assignment of reference status. The factors of relative value of the territory and the scores by which they are assessed are given in Table 1. The territory of a constituent entity of the Russian Federation is divided into assessment areas, usually delimited by municipal boundaries, and these areas are assessed relative to each other on a scale from 0 to 1. Diverse information is systematized and structured using a tool called linear interpolation.

The third stage consists of presenting a comprehensive assessment of the territory in the form of electronic maps using geographic information systems. After adapting the methodology for comprehensive assessment of the territory for the purpose of assigning the status of a support centre to a settlement, maps should be constructed based on the relative value of municipal formations. The result of this stage is a spatial visualization of the assessment results.

The fourth stage involves calculating the priority of the territory for the allocation of KS based on relative value factors. The stages of this stage are:

1) development of a priority matrix;

2) conducting a survey of experts to determine the significance coefficients;

3) the result of this stage is the construction of a final map with the identification of KS.

The fifth stage is the ranking of the selected KS according to the theory of central places. The selected territory is considered as a settlement network along the fastest route for obtaining social and domestic services (according to W. Christaller).

RESEARCH RESULTS

The Rostov Region was selected as the object of research. The phased implementation of the methodological tools is presented below.

The first stage involved collecting initial information: an analysis was conducted of the territorial and spatial organization of the Rostov Region within the framework of the development of the KS, methodological recommendations and regulatory and legal acts. The characteristics of infrastructure and spatial development, the main areas of industrial complexes and the level of development of the social infrastructure of cultural facilities were identified. The information collected was

systematized for further transformation into a system of criteria for comprehensive assessment of the territory.

The second stage involved adapting the methodology for comprehensive assessment of the territory to optimize the process of selecting priority KS in the Rostov Region.

It should be noted that there are 55 municipalities (hereinafter referred to as MP) and urban districts (hereinafter referred to as UD) in the Rostov Region. In accordance with the approved methodological recommendations, the list of MP and UD included in the calculation has been adjusted. Territories that are officially part of the Rostov agglomeration have been excluded from the list:

1) urban districts: Rostov-on-Don, Azov, Bataysk, Novocherkassk, Taganrog;

2) municipal formations: Azov municipal district, Aksai municipal district (including urban and rural settlements), Myasnikovsky municipal district and Neklinovsky municipal district.

Table 2–4 provide a detailed description of one of the criteria, “Condition of the road network and road coverage of the territory”, and the mechanism for its assessment. This is a complex factor. The information entered for the assessment of the Rostov Region includes two sub-factors.

- 1. Road network coverage of the territory.
- 2. Road network condition.

Table 2 and 4 show examples for 10 of the 44 municipalities assessed, while Table 3 shows examples for all districts of the Rostov Region.

Information on sub-factor 1 — road network coverage. The coverage indicator per 1,000 inhabitants

Table 2. Numerical value — road network coverage of the territory

Municipal district	Area, km²	Length, kilometres	Density, per 100 km² of territory	Score	Result
Bagaevsky District	950.6	Federal	0.00	0	0.47
		Regional = 77.62	8.17	0.18	
		Intermunicipal = 72.1	7.58	0.29	
Belokalitvinsky District	2,649.8	Federal = 40 (21)	1.51	0.12	0.32
		Regional = 48.7	1.84	0.04	
		Intermunicipal = 109.5	4.13	0.16	
Bokovsky District	1,927	Federal	0.00	0	0.18
		Regional = 106.1	5.51	0.12	
		Intermunicipal = 29.6	1.54	0.06	
Verkhnedonskoy District	2,675	Federal	0.00	0	0.2
		Regional = 98.6	3.69	0.08	
		Intermunicipal = 78.95	2.95	0.12	
Veselovsky District	1,355	Federal	0.00	0	0.19
		Regional = 89.24	6.59	0.14	
		Intermunicipal = 18.6	1.37	0.05	
Volgodonsk District	1,479	Federal	0.00	0	0.28
		Regional = 102.51	6.93	0.15	
		Intermunicipal = 49.4	3.34	0.13	
Dubovskiy District	3,997.09	Federal	0.00	0	0.18
		Regional = 99.5	2.49	0.05	
		Intermunicipal = 136.77	3.42	0.13	
Yegorlyksky District	1,460	Federal	0.00	0	0.32
		Regional = 100.09	6.86	0.15	
		Intermunicipal = 61.45	4.21	0.17	
Zavetinsky District	4,694.56	Federal	0.00	0	0.14
		Regional = 38.6	0.82	0.01	
		Intermunicipal = 151.55	3.23	0.13	
Zernogradsky District	2,663	Federal	0.00	0	0.14
		Regional = 127.01	4.77	0.1	
		Intermunicipal = 87.4	3.28	0.13	

in the Rostov Region is 8.6 km. The road network density is 357 km/1,000 km². The Rostov Region is characterized by an uneven distribution of the road network, with road density decreasing from large urban centres to the periphery. The districts with the most extensive road networks are:

- Azov;
- Aksai;
- Oktyabrsky;
- Semikarakorsk.

Areas with an insufficient road network⁴:

- Zavetinsky;
- Morozovsky;
- Remontnensky.

Based on the results of the assessment of road density, the values were interpolated and converted into scores from 0 to 1 (see Table 2).

The numerical value of each sub-factor is accepted within the following limits:

- level of federal road density — 0–0.4;
- level of regional road density — 0–0.3;

- density level of intermunicipal roads — 0–0.3.

The relative significance indicator for the urban districts of the Rostov Region is 1, as they serve as the main transport hubs of the region.

Subfactor 2 — road network condition assesses the quality of road network coverage that does not meet regulatory requirements. Areas where some of the roads have been brought up to standard are assessed at 0.5 points if these improvements have been made. As part of the assessment, a point grading table has been compiled, according to which each area is assigned a score on three indicators depending on the condition of the road network and the availability of such networks (Table 3).

In 2024, out of 344 municipal facilities, 98 sections of the street and road network in Azov, Aksai, Verkhnedonsk, Zernograd, Yegorlyksky, Konstantinovsky, Krasnosulinsky, Matveevo-Kurgan, Neklinovsky, Oktyabrsky, Ust-Donetsky, and Tselinsky districts and the cities of Azov, Bataysk, and Rostov-on-Don.

At the same time, there are a number of unresolved issues in municipal formations, one of which is the proportion of roads that do not meet regulatory requirements. Thus, this indicator averages 41.5 %

⁴ Road Complex, Official Portal of the Government of the Rostov Region. URL: <https://www.donland.ru/activity/198/>

Table 3. Estimated total score for the road network condition sub-factor

Municipal district	The most extensive road network is characterized by	0–0.33	Condition of the road network				Total score
			Brought into compliance with regulations	0–0.33	Road networks that meet regulatory requirements	0–0.33	
Bagaevsky	1	0.33	0.5	0.17	0	0.00	0.50
Belokalitvinsky	1	0.33	0.5	0.17	0	0.00	0.50
Verkhnedonskoy	0.25	0.08	0	0.00	1	0.33	0.41
Yegorlyksky	0.5	0.17	0	0.00	0.5	0.17	0.33
Zavetinsky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Zernogradsky	0	0.00	0.5	0.17	0	0.00	0.17
Konstantinovsky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Krasnosulinsky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Matveyev-Kurgan	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Morozovsky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Oktyabrsky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Proletarsky	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.00
Remontnensky	0.25	0.08	0.5	0.17	0	0.00	0.25
Salsky	1	0.33	0.5	0.17	0	0.00	0.50
Semikarakorsk	0.25	0.08	0	0.00	1	0.33	0.41
Soviet	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.00
Ust-Donetsk	0.25	0.08	0	0.00	1	0.33	0.41
Tselinsky	1	0.33	0	0.00	0	0.00	0.33
Other areas of the region	0.25	0.08	0	0.00	1	0.33	0.41

Table 4. Numerical expression of the road network condition factor and road network coverage of the territory across 10 municipalities

Municipal district	Subfactor — condition of the road network	0–0.5	Subfactor — road network coverage of the territory	0–0.5	Final score
Bagaevsky	0.50	0.25	0.47	0.24	0.5
Belokalitvinsky	0.50	0.25	0.32	0.16	0.4
Bokovsky	0.41	0.21	0.18	0.09	0.3
Verkhnedonskoy	0.41	0.21	0.2	0.10	0.3
Veselovsky	0.41	0.21	0.19	0.10	0.3
Volgodonsk	0.41	0.21	0.28	0.14	0.3
Dubovsky	0.41	0.21	0.18	0.09	0.3
Yegorlyksky	0.33	0.17	0.32	0.16	0.3
Zavetinsky	0.25	0.12	0.14	0.07	0.2
Zernogradsky	0.17	0.08	0.14	0.07	0.2

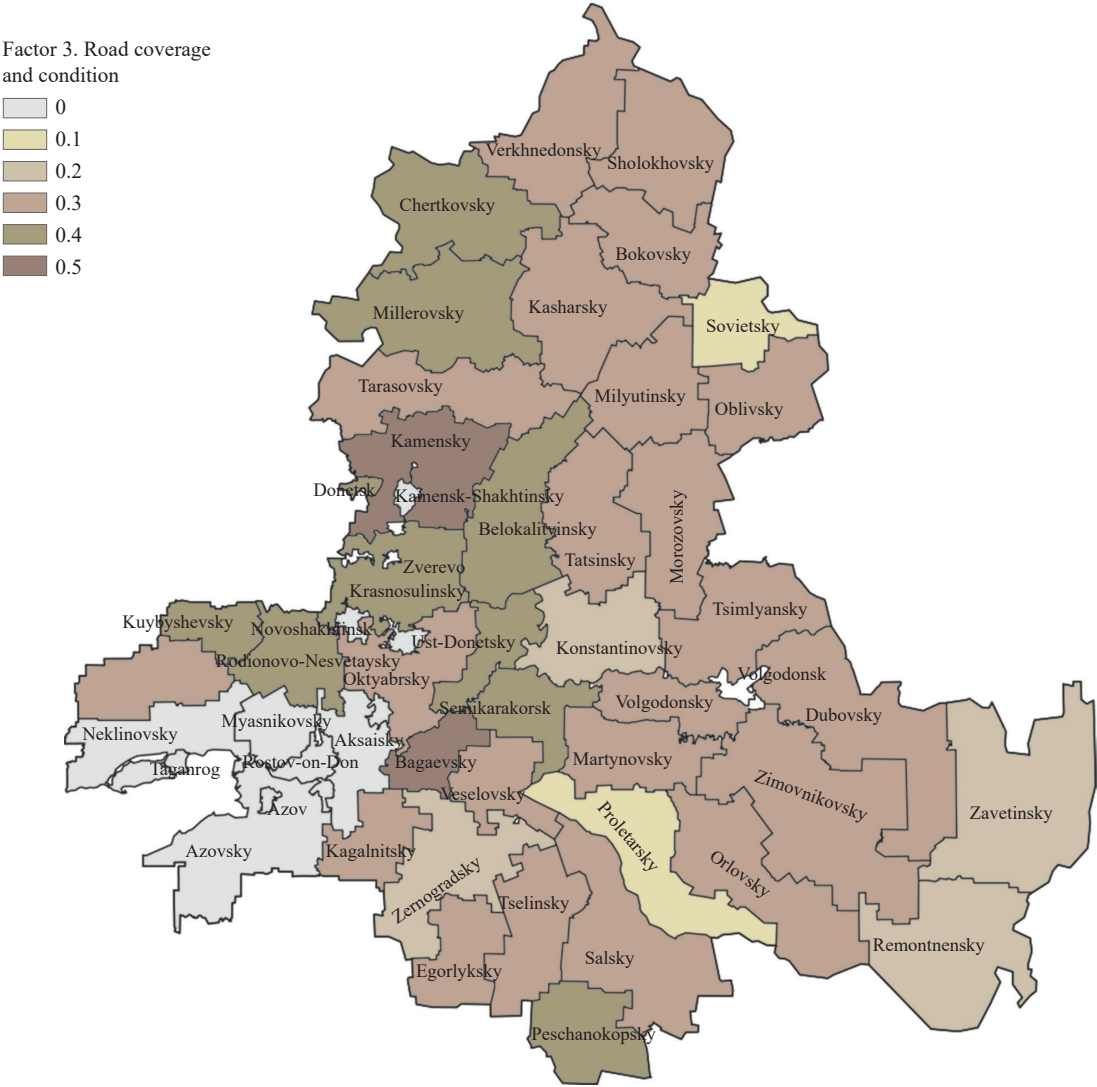


Fig. 3. Electronic map of the comprehensive assessment of the Rostov Region based on the factor “Condition of the road network and availability of the territory’s motorway network”

Table 5. Priority matrix of factors for assessing the territory for the selection of KS

Functional purpose	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
KS	1. Population	2. Transport accessibility radius zone	3. The condition of the road network and the provision of the territory with a network of motor roads	4. Availability of outpatient treatment facilities	5. Level of engineering development of the territory	6. Engineering-geological conditions of the territory	7. Level of development of cultural and consumer services for the population	8. Assessment of forest and water resources
k	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8

or 11.4 thousand km of roads (out of 27.7 thousand km) across the region. The problem of roads that do not meet regulatory requirements is most acute in the Soviet rural district (68.9 %), the Proletarsky district (65.8 %), the city of Taganrog (64 %), the city of Shakhty (63.2 %), the Bagaevsky district (54.9 %), Salsky District — 53.8 %⁴. After processing the results of the analysis of the current state of the road network in the Rostov Region, the information is presented in Table 3. Table 4 summarizes the two sub-factors and calculates the final values of the factor “State of the road network and provision of the territory with a network of motor roads”.

The third stage involved creating eight thematic maps based on comprehensive assessment factors.

Due to the fact that some comprehensive assessment factors are composite, it was necessary to first construct maps corresponding to their sub-factors and then construct the resulting map. The map “Condition of the road network and provision of the territory with a network of motor roads” (Fig. 3) is presented as an example.

The fourth stage involves calculating the priority of the territory for the selection of KS.

The priority matrix is constructed based on the determination of the significance coefficients of each factor of the comprehensive assessment for the selection of KS (Table 5).

The calculation of the significance coefficients of relative value factors for assigning the status of a key settlement to a settlement was carried out using the expert survey method. Four experts completed questionnaires, which were then processed to produce the priority matrix shown in Table 6.

The dependence of the level of influence of factors on assigning the status of a reference settlement to a reference settlement can be represented as a function:

$$B_{mp} = \sum F_i \cdot K_i^j = F_1 \cdot k_1 + F_2 \cdot k_2 + F_3 \cdot k_3 + F_4 \cdot k_4 + F_5 \cdot k_5 + F_6 \cdot k_6 + F_7 \cdot k_7 + F_8 \cdot k_8,$$

where B_{mp} is the indicator of the value of the municipal formation for assigning the status of a base settlement to a settlement; F_i is the i -th coefficient of relative value of the territory; K_i is the coefficient of significance of the i -th factor.

The distribution of priority factor ratings with the calculated value indicator of the territory for each district is shown in Fig. 4.

In order to identify the most promising areas for the development of settlements as hubs, the results of a comprehensive assessment of the Rostov Region were ranked (Table 7).

According to a comprehensive assessment of the Rostov Region, the highest priority areas for the cre-

Table 6. Priority matrix of factors for assessing the territory for selecting KS after processing the expert survey questionnaires

KS	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
Member of Expert Commission No. 1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
Member of Expert Commission No. 2	1	0.5	0.5	1	1	0.5	1	0.25
Member of Expert Commission No. 3	1	1	1	1	0.5	0.25	0.5	0.5
Member of Expert Commission No. 4	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.25
Average coefficient	0.8	0.9	0.9	1.0	0.6	0.4	0.6	0.4

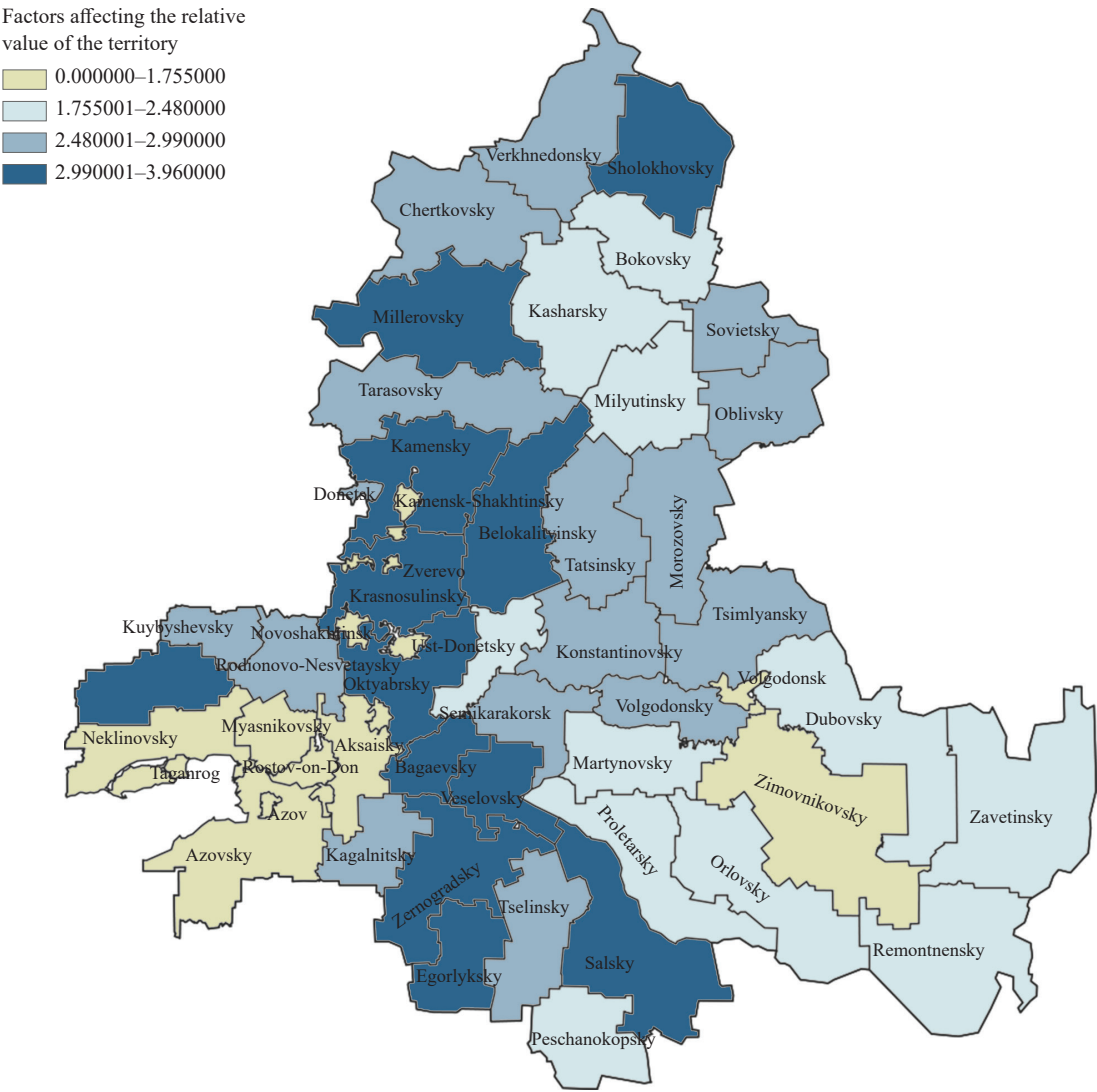


Fig. 4. Electronic map showing the distribution of functional priority ratings for areas selected for KS

ation of KS are: Bagaevskiy, Belokalitvinskii, Veselovskiy, Egorlykiskiy, Zernogradskiy, Kamenskii, Krasnosulinskii, Millerovskiy, Oktyabrskiy, Salskiy, and Sholokhovskiy districts.

The final fifth stage is the ranking of KS in the Russian Federation according to the theory of central places. As an example, let us choose the municipal district with the highest value indicator, namely the Belokalitvinskii district (3.960 on the priority indicator).

Belaya Kalitva should be considered a first-order KS. First-order settlements are formed at the intersection of the largest hexagonal grid. When Belaya Kalitva is

designated as a first-order point, the city becomes a central point (“higher-order centre”), providing the popula-

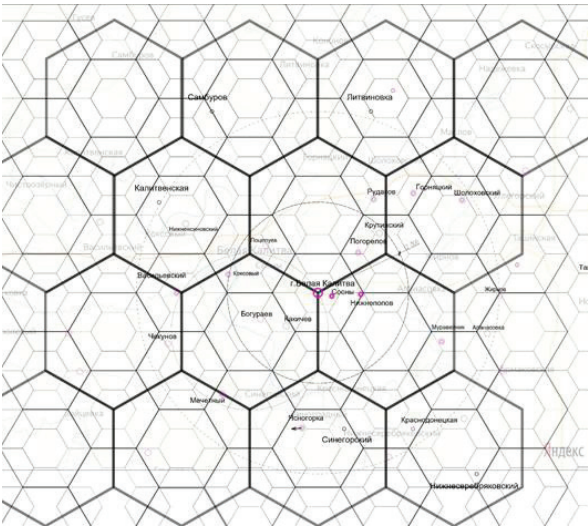


Fig. 5. Hexagonal grid network with the number of additional areas of the next lower level of hierarchy, where the central location of the first order is the city of Belaya Kalitva

Table 7. Ranking of the results of a comprehensive assessment of the Rostov Region to determine the KS

Territory value indicator	Level of potential for development of KS
1.755–2.480	Low
2.505–2.990	Average
3.035–3.960	High

Table 8. Results of the distribution of settlements by hierarchy levels, according to the Christaller grid

Level of order in a settlement	Existing settlements located at grid nodes	Settlements that may be at a different level in the hierarchy
First order	Belaya Kalitva; Nizhneserebryakovsky farmstead; Kalatvenskaya stanitsa	Krasnodonetskaya village; Zhirmov settlement (part of the Tatsinsky district); Vasilyevsky farmstead; Sholokhovsky urban-type settlement
Second order	Samburov farmstead; Litvinovka village; Sine-Gorsk settlement	Rudakov farmstead; Gornatsky settlement; Pogorelov farmstead; Nizhnepopov farmstead; Muraveynik farmstead; Yasnogorka settlement; Mechetny farmstead; Kakichev farmstead; Koksovy settlement

tion with a variety of services and goods of the highest level of complexity (e.g., specialized medicine, higher education, cultural institutions).

Second-order centres are settlements located at the intersection of the second-order hexagonal grid. These are smaller towns or villages located near Belaya Kalitva. They provide basic services (schools, clinics, essential shops) and are focused on serving the surrounding rural areas and suburbs.

The radius of the circle within which the first-order honeycomb is constructed is 7 km. The hexagonal grid network with the number of additional areas of the next second-order hierarchy, where the central point of the first order is the city of Belaya Kalitva, is shown in Fig. 5.

Table 8 shows the settlements that are centres of the 1st and 2nd order, as well as those that can be considered as such when changing the hexagonal grid to ensure balanced development in the formation and optimization of the KS network [31].

CONCLUSION AND DISCUSSION

This study has developed a methodology for optimizing the spatial planning process at the level of the constituent entities of the Russian Federation. Given

limited resources (both time and material), the development of KS must be strategically sound both in terms of the existing development of the territory and in terms of future changes for each region. Targeted development and selection of settlements that are priorities for development as KS is only possible with a structural, systematic approach and decomposition of existing conditions into criteria at the regional level that reflect the sufficiency of resources and potential of these territories.

The developed theoretical and methodological tools allow for the selection of optimal settlements as “supporting” ones, but it is necessary to develop them further at the level of a detailed assessment of each KS in terms of:

- a comfortable urban environment;
- providing the population with the necessary infrastructure (social, domestic, and transport);
- the formation of a sustainable economic system, places of employment, etc.

The proposed methodology is universal and can be applied when municipal authorities make decisions on the distribution of material resources for the development of KS, specifically in terms of the priority selection of such territories.

REFERENCES

1. Evlampieva E.V. Key settlements in the conditions of spatial development of the Russian Federation. *Business. Education. Right.* 2025; 2(71):147-152. DOI: 10.25683/VOLBI.2025.71.1315. EDN OXYXND. (rus.).
2. Nefedova T.G., Glezer O.B. Transformation of Russia’s social-geographical space. *Challenges and Policy of Russia’s Spatial Development in the 21st Century.* 2020; 214-251. EDN FSZDAW. (rus.).
3. Tsyrenov D.D., Saveliev S.A. The main stages of the formation of theories of regional and territorial development. *Naukosfera.* 2024; 6-2:454-459. DOI: 10.5281/zenodo.12645126. EDN ETLCZD. (rus.).
4. Gamidullaeva L.A., Grosheva E.S., Belogradova O.A., Shevchenko D.N. Balanced development of the territory: approaches to determination and assessment. *Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society.* 2022; 3(43):25-41. DOI: 10.21685/2227-8486-2022-3-2. EDN WJKLDE. (rus.).
5. Korobov V.B., Kochurov B.I., Lokhov A.S., Tutuyin A.G. Geographical Objects as Systems: Adequate Properties and Functions. *Geography and Natu-*

ral Resources. 2023; 44(4):306-313. DOI: 10.1134/s187537282304008x

6. Korobeinikova A., Danilina N., Teplova I. Planning Public Space Climate Comfortability: A GIS-Based Algorithm for the Compact Cities of the Far North. *Land*. 2024; 13(11):1763. DOI: 10.3390/land13111763

7. Christaller W. How i discovered the theory of central places: a report about the origin of central places. *Urban Studies and Practices*. 2024; 9(1):6-14. DOI: 10.17323/usp9120246-14. EDN DZLDJY. (rus.).

8. Lappo G.M. The concept of a basic skeleton of the economic spatial structure: development, theoretical and practical role. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geographical Series*. 1983; 5:16-28. EDN JDSFWA. (rus.).

9. Khorev B.S. *Territorial organization of society: (current problems of regional management and planning in the USSR)*. Moscow, Mysl, 1981; 320. (rus.).

10. Yolshina A.A. Urban agglomerations: theoretical problems and the analysis of foreign experience. *Modern scientific researches and innovations*. 2015; 7-3(51):53-59. EDN UHWIBV. (rus.).

11. Sadkovskaya O.E. Asymmetry of the settlement system in the Rostov region: problem statement. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2025; 1(70):158-172. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-158-172. EDN OHQYEH. (rus.).

12. Markwart E., Kiseleva N.N., Sosnin D.P. The system of central (reference) settlements as a management tool: theoretical and practical aspects. *The Authority*. 2022; 30(2):95-111. DOI: 10.31171/vlast.v30i2.8939. EDN UNFDYM. (rus.).

13. Roy O.M., Bichun V.S. Reference settlement in the context of Russia's new spatial strategy. *Municipal Academy*. 2025; 3:81-89. DOI: 10.52176/2304831X_2025_03_81. EDN PDPOLU. (rus.).

14. Artemova E.I., Plotnikova E.V., Litra E.N. Support settlements as an institute of complex development of rural areas. *International Agricultural Journal*. 2025; 2(404):169-173. DOI: 10.55186/25876740_2025_68_2_169. EDN LSDTBR. (rus.).

15. Artemova O.V. Project-based approach to urban environment quality management: searching for new opportunities. *Bulletin of SUSU. Series "Economics and Management"*. 2025; 19(2):29-40. DOI: 10.14529/em250203. EDN SPQQAM. (rus.).

16. Pekurovskiy D.A., Kontsevaya S.Yu. Trends in spatial changes in rural areas. *Agrarian Science*. 2023; 3:128-131. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-368-3-128-131. EDN SDIEJE. (rus.).

17. Evsyukova T.G., Simonovsky N.A. The social infrastructure of rural areas: the state and the prospects of development. *Economics, Labor, Management in Agriculture*. 2025; 8(126):213-221. DOI: 10.33938/258-213. EDN XYLPWS. (rus.).

18. Berendeeva A.B., Rychikhina N.S. Sustainable development and esg transformation of small towns: theories, concepts, approaches. *News of higher educational institutions. The series "Economics, Finance and production management"*. 2025; 2(64):71-82. DOI: 10.6060/ivecofin.2025642.724. EDN HJSGZK. (rus.).

19. Sadkovskaya O.Ye. "New urban planning policy" in the Rostov region. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2023; 4(84). DOI: 10.47055/19904126_2023_4(84)_13. EDN VEYCRJ. (rus.).

20. Glichich-Zolotareva M.V. Spatial development strategy of the Russian Federation: new approaches (Russia, Moscow). *Problems of Modern Economics*. 2024; 4(92):10-13. EDN RMMYGG. (rus.).

21. Makhmudov R.K., Eshrokov V.M., Cherkasov A.A., Turun P.P., Lutsenko D.A. GIS-modeling of the Stavropol Krai Budyonnovsky municipal district local settlement systems. *Geodesy and Cartography*. 2023; 84(10):29-38. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-29-38. EDN WAZOHI. (rus.).

22. Kramarov S., Mityasova O., Temkin I., Khramov V. *Objects' identification in geospatial sociotechnical systems*. Moscow, OOO "RIOR Publishing Center", 2024; 186. DOI: 10.29039/02146-0. EDN JDRINK. (rus.).

23. Medvedeva L.S., Zemlyakova N.S. Diagnostics of socio-demographic security of the region. *Science Almanac of Black Sea Region Countries*. 2025; 11(1):13-21. DOI: 10.23947/2414-1143-2025-11-1-13-21. EDN UWITRF. (rus.).

24. Kabakova S.I. *Urban development assessment of city territories*. Moscow, Stroyizdat, 1971; 153. (rus.).

25. Romm A.P. Mathematical and modeling foundations of complex assessment and functional zoning of urban areas. *Assessment Issues*. 1997; 4:2-11. EDN ONZNRH. (rus.).

26. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Principles of assessing the effectiveness of urban development in Russia. *Economics of Construction and Nature Management*. 2022; 1-2(82-83):134-144. EDN IPPQYK. (rus.).

27. Fedorovskaya A.A., Gladysheva O.D. A simulation model for assessing the impact of the renewable energy facilities on the ecological condition of a subject of the Russian Federation. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024; 3(3): 49-60. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-3-49-60. EDN EOFJCQ. (rus.).

28. Ioseliani N.A. Methodological approaches to estimated zoning for the purposes of state cadastre evaluation. *Property Relations in the Russian Federation*. 2018; 7(202):41-49. DOI: 10.24411/2072-4098-2018-17002. EDN XTUGOL. (rus.).

29. Sheina S.G., Umnyakova N.P., Zilberova I.Yu., Fedorovskaya A.A., Giryva L.V., Khorenkov S.V. et al. *Sustainable development of the construction industry taking into account climate change*. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2024; 160. EDN VCPGST. (rus.).

30. Ermolaeva S.V., Kochurov B.I. Natural landscape differentiation and natural sustainability of regional ecosystems. *Ecology of Urban Areas*. 2024; 1:23-30. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-23-30. EDN DFATAS. (rus.).

31. Gertsberg L.Ya. Towards balanced spatial development of Russian Federation. *Academia. Architecture and Construction*. 2024; 1:122-130. DOI: 10.2233 7/2077-9038-2024-1-122-130. EDN UYUKFD. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Albina A. Fedorovskaya** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Management; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; bina-87@mail.ru;

Daria S. Vyshlova — chief specialist; **Center for Information Support of Urban Development Activities**; 12 Voroshilovsky avenue, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; dariavyshlovaaa@mail.ru.

Contribution of the authors:

Albina A. Fedorovskaya — scientific management, research concept, development of methodology, formation of the research plan, final conclusions.

Daria S. Vyshlova — analysis of literary sources, processing of statistical information, calculations, design of research results, formation of electronic maps, refinement of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Пространственные характеристики городской среды
как факторы доступности

Екатерина Олеговна Савельева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Подчеркивается необходимость перехода от парадигмы мобильности к парадигме доступности, трактуемой как ключевой индикатор качества городской среды, отражающий возможности населения достигать пространственно распределенные объекты и функции при заданных затратах. Для российских городов особую значимость приобретает комплексный подход к оценке доступности, предусматривающий согласованное развитие транспортной инфраструктуры и пространственной организации территории.

Материалы и методы. Выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы, систематизированы подходы к измерению доступности и предложена классификация методов в семи группах: топологические, изолинии, методы потенциальной доступности (гравитационные), балансовые, инфраструктурно-сетевые, пространственно-временные и комплексные индексные методы.

Результаты. Установлено, что параметры планировочной структуры — плотность и смешение функций, связность и проницаемость уличной сети, обеспеченность остановками и маршрутами — оказывают значимое влияние на уровень доступности. Обобщены сильные и слабые стороны различных методов оценки. Показаны возможности применения цифровых инструментов для комплексного анализа морфологии и транспортной системы в оценке доступности.

Выводы. Сделан вывод о необходимости интегральной оценки доступности, объединяющей транспортные и морфологические параметры. Для российской практики перспективным является внедрение индикаторов, чувствительных к различиям планировочной структуры, что позволит выявлять транспортное неравенство и формировать обоснованные градостроительные решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительство, транспортная доступность, пространственные характеристики, планировочная структура, морфология городской ткани, связность уличной сети, изохроны, гравитационные модели

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Савельева Е.О. Пространственные характеристики городской среды как факторы доступности // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.5

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Олеговна Савельева, e.saveleva@pstu.ru.

Spatial characteristics of the urban environment
as factors of accessibility

Ekaterina O. Saveleva

Perm National Research Polytechnic University; Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. It is emphasized that a shift is required from the paradigm of mobility to the paradigm of accessibility, conceived as a key indicator of urban quality, reflecting the population's ability to reach spatially distributed destinations and functions within given costs. In the context of Russian cities, particular importance is attached to a comprehensive approach to assessing accessibility, which presupposes the coordinated development of transport infrastructure and the spatial organization of urban territory.

Materials and methods. A review of domestic and international literature has been conducted, approaches to measuring accessibility have been systematized, and a classification of methods into seven groups has been proposed: topological, isoline, potential accessibility (gravitational) methods, balance methods, infrastructure-network methods, spatio-temporal methods, and comprehensive index methods.

Results. It was found that morphological parameters such as density and land-use mix, street connectivity and permeability, block size, and provision of stops and routes significantly influence accessibility levels. Strengths and weaknesses of different methods were summarized. The potential of digital tools was demonstrated for studying the interaction of urban form and transport systems.

Conclusions. The study concludes that accessibility assessment should combine transport and morphological dimensions. For the Russian context, the introduction of indicators sensitive to differences in urban form is considered promising, as it can reveal transport inequality and support evidence-based planning decisions.

KEYWORDS: urban planning, transport accessibility, spatial characteristics, planning structure, urban morphology, street connectivity, isochrones, gravity models

FOR CITATION: Saveleva E.O. Spatial characteristics of the urban environment as factors of accessibility. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.5

Corresponding author: Ekaterina O. Saveleva, e.saveleva@pstu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного времени транспортная политика в городах ориентировалась на обеспечение эффективной мобильности, понимаемой как максимизация скорости и дальности передвижения. Такой подход приводил к росту автомобилизации, пространственному рассредоточению и снижению качества городской среды [1, 2]. Переход к парадигме устойчивого развития в 1990-е гг. обусловил смещение фокуса от мобильности к доступности, т.е. возможности достижения жизненно необходимых целей в пределах приемлемых затрат времени и ресурсов [3, 4]. Доступность стала рассматриваться не только как транспортная характеристика, но и как интегральный индикатор, отражающий условия организации городской среды и ее способность удовлетворять потребности населения [5, 6].

В российской политике идея доступности была институционализована сравнительно недавно: в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года впервые на государственном уровне поставлена задача повышения пространственной связанности и транспортной доступности территорий¹. Однако в Стратегии доступность трактуется преимущественно в отраслевой логике — через обновление подвижного состава, развитие магистральной инфраструктуры и улучшение показателей транспортного обслуживания. Вопросы интеграции транспорта и землепользования остаются второстепенными, а градостроительный аспект доступности не получает должного отражения. В современных российских городах сохраняется дезинтеграция систем землепользования и транспорта; размещение жилых районов, рабочих мест и сервисов часто не согласуется с возможностями их достижения [5, 7, 8]. В результате складываются пространственные диспропорции, усиливающие зависимость от индивидуального транспорта и снижающие уровень территориальной справедливости. Обеспечение устойчивой городской среды требует комплексного градостроительного подхода, включающего согласованное планирование развития пространственной организации территории и транспортной инфраструктуры [9].

Современная научная и практическая повестка предполагают переход от понимания транспортной доступности как исключительно транспортной характеристики к ее рассмотрению как комплексного градостроительного индикатора. В этой связи особую актуальность приобретают систематизация

понятийного аппарата, анализ существующих научных подходов к измерению транспортной доступности, а также исследование роли пространственных характеристик городской среды в формировании условий транспортной доступности.

Теоретические подходы к анализу транспортной доступности

Понятие доступности

Понятие доступности (англ. *accessibility*) занимает важное место в теории и практике нескольких смежных дисциплин: географии, региональной экономики, транспортного планирования и градостроительства. В широком междисциплинарном контексте доступность может рассматриваться как характеристика территории, показывающая степень (потенциальной и реальной) достижимости определенной точки пространства выбранными способами [10–12]. Доступность в экономико-географической традиции понимается как свойство удаленности/близости объекта или возможность его достижения по существующей транспортной сети [13], либо инструмент анализа изолированности территорий и диспропорций развития [13–15].

В области градостроительства и территориального планирования транспортная доступность закрепились как нормативно-пространственная характеристика, связанная с радиусами обслуживания объектов социальной инфраструктуры, а также с шаговой доступностью остановок и пересадочных узлов [16]. Исследования по социальной политике и прикладной демографии трактуют доступность как равенство возможностей населения по достижению базовых социальных благ — образования, медицины, административных услуг, а также индикатор транспортной дискриминации [17–19]. В инженерном транспортном моделировании понятие используется преимущественно в операционном смысле — как временные и пространственные параметры доступа к транспортной сети или ключевым объектам [20, 21]. Даже при реализации сложных алгоритмов расчета транспортных потоков понятие доступности зачастую не выступает самостоятельной аналитической категорией, а лишь сопровождает традиционные показатели мобильности.

Таким образом, несмотря на универсальность термина «доступность», его смысловая нагрузка и методика оценки существенно различаются в зависимости от дисциплинарного контекста. В российской практике сохраняется фрагментарность трактовок: наиболее полно категория доступности разработана в социально-экономической географии, частично закреплена в градостроительстве и социальной политике, но остается недостаточно инте-

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р.

грированной в городское планирование. Это затрудняет формирование единой методологической базы и актуализирует задачу адаптации международных подходов к отечественным условиям.

В рамках настоящего исследования под транспортной доступностью для градостроительного анализа понимается интегральная характеристика городской среды, отражающая суммарную досягаемость населением пространственно распределенных возможностей (рабочие места/услуги/инфраструктура) при заданных обобщенных затратах на их достижение по реальной транспортной сети (при этом веса возможностей и затраты перемещения определяются конфигурацией сети и морфологией городской среды).

Эволюция методов оценки транспортной доступности

Эволюция подходов к оценке транспортной доступности прошла путь от ранних моделей советской экономико-географической школы, опиравшихся на такие показатели, как густота дорожной сети и коэффициенты обеспеченности инфраструктурой [13–15], к современным комплексным методам, основанным на больших данных и ориентированным на фактическое поведение пользователей [12]. Советская школа заложила прочный теоретический фундамент, однако ее подходы имели ряд ограничений: акцент на макроуровне затруднял применение результатов в городском масштабе, а используемые статические показатели не отражали динамическую природу доступности в условиях высокоурбанизированной среды. В 1990–2000-е гг. в российских исследованиях наметился сдвиг к учету пассажиропотоков и территориальной организации городов. В последние годы в практику все активнее внедряются методы, опирающиеся на большие данные, цифровые следы мобильности и поведенческие характеристики пользователей. Этот переход отражает общемировую тенденцию к пониманию доступности как многофакторной категории, в которой учитываются не только транспортные, но и социальные, пространственные и экологические измерения.

Несмотря на продолжительный интерес к концепции доступности со стороны отечественных географов [11, 13, 22] и активное развитие этой темы в международной научной литературе в области урбанистики и городского планирования [23–25], в российской градостроительной теории и практике концепция доступности на сегодняшний день по-прежнему остается недостаточно проработанной и систематизированной. На прикладном уровне в российских городах доступность до сих пор оценивается преимущественно в рамках базового маршрутного анализа для генеральных планов и комплексных схем транспортного планирования. Это существенно уступает зарубежным подходам, где транспортная доступность рассматривается как один из ключевых индикаторов социальной

справедливости, устойчивого развития, пространственной интеграции и эффективности городской структуры [26].

Современные трактовки как в отечественных, так и в зарубежных научных работах, все чаще определяют транспортную доступность как многопараметрическую категорию, включающую физические, временные, экономические, социальные и экологические характеристики, однако универсальный термин по-прежнему отсутствует, что обуславливает вариативность методов и критериев ее оценки [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для систематизации существующих подходов к оценке транспортной доступности в контексте городского планирования разработана классификация, включающая семь групп методов. Основанием для классификации выступает их соответствие задачам анализа и проектирования городской среды, а также различия по математическому аппарату и степени пригодности для практического применения — от топологических моделей до интегральных индексов, учитывающих морфологические и социальные характеристики.

Топологические методы опираются на анализ структуры улично-дорожной сети (УДС) в графовой форме. Они позволяют выявлять ключевые узлы и направления движения, что важно при проектировании новых связей. Наиболее известной является методика пространственного синтаксиса (Space Syntax), разработанная Б. Хиллером и Дж. Хансоном [27], получившая широкое распространение в анализе городов различного масштаба [28–30] (рис. 1). Несмотря на универсальность и широкое распространение, данный подход ограничен тем, что игнорирует временные и стоимостные параметры, имеющие ключевое значение для оценки реальной транспортной доступности.

Методы изолиний позволяют визуализировать границы достижимости территории в форме изохрон (по времени), изодистант (по расстоянию) и изодапан (по стоимости перемещения). Их преимущество заключается в наглядности, что делает данные методы особенно востребованными при оценке радиусов доступности объектов социальной инфраструктуры и транспортных узлов. Отечественными авторами изохроны применялись, например, для анализа транспортной доступности территории Перми [31] (рис. 2). Кроме того, в отечественной научной традиции получили распространение изодистанты и так называемые «километрограммы» А.М. Якшина, используемые для графоаналитической оценки пространственных различий [32].

Методы потенциальной доступности основаны на гравитационных моделях, предложенных В.Г. Хансеном [33]. Они учитывают «притягательность» целей и затраты на их достижение, что позволяет оценивать сбалансированность пространственного разви-

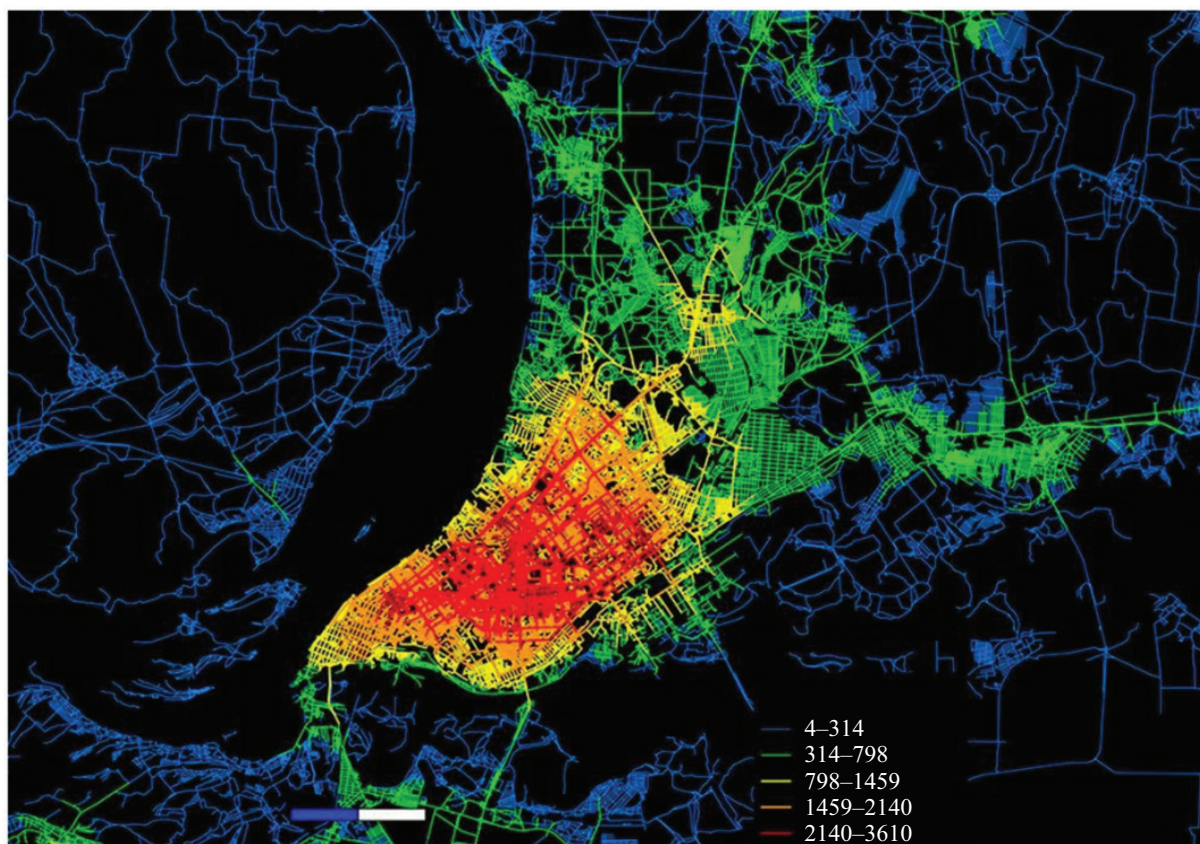


Рис. 1. Связанность территории г. Самары согласно теории пространственного синтаксиса [30]

тия. Применение показало высокую эффективность при анализе доступности рабочих мест [34], однако модели критикуются за игнорирование влияния конкуренции за ресурсы [35, 36]. Для учета метода разработаны модифицированные показатели и *балансовые модели* [11, 37]. Следует отметить, что в отечественной практике гравитационные модели закрепились преимущественно в составе четырехэтапного транспортного моделирования, где они используются для расчета корреспонденций и прогнозирования потоков. В международной традиции они интерпретируются шире — как инструмент оценки транспортного спроса и одновременно как показатель пространственной доступности, применяемый в градостроительном анализе [38, 39] (рис. 3).

Инфраструктурно-сетевые, пространственно-временные и индексные методы развиваются в условиях цифровизации. Первые опираются на GTFS-данные (общедоступный формат описания расписаний движения общественного транспорта) и графовые базы [40, 41]. Они позволяют учитывать расписание движения и реальную динамику транспортного обслуживания, что делает их полезными для оптимизации маршрутов и планирования транспортных узлов. Ограничением выступает зависимость от полноты и достоверности исходных сведений.

Пространственно-временные методы, восходящие к концепции Т. Хегерстранда [42], ориен-

тированы на учет индивидуальных ограничений и траекторий мобильности; использование этих навигационных систем и дневников перемещений дает возможность выявлять межличностные различия и обеспечивает более точное отражение динамики городской мобильности [43]. Их преимущество заключается в высокой точности, а ограничение — в сложности сбора и обработки персональных данных.

Композитные индексы строятся с применением многокритериальных процедур и машинного обучения [44, 45], что позволяет выявлять дисбаланс между охватом сети и фактическими условиями достижения целей. Эти подходы особенно востребованы при сценарном моделировании, однако интерпретация таких индексов затруднена, а их использование требует значительных объемов информации. В то же время именно этот класс методов открывает перспективы для интеграции морфологических характеристик городской среды в модели оценки транспортной доступности и применения нейросетевых алгоритмов, способных учитывать нелинейные зависимости между планировочной структурой и фактическим уровнем достижимости. Такой подход даст возможность адаптировать международный опыт к специфике постсоветских городов и повысить чувствительность аналитических инструментов к пространственным различиям внутри городской ткани.

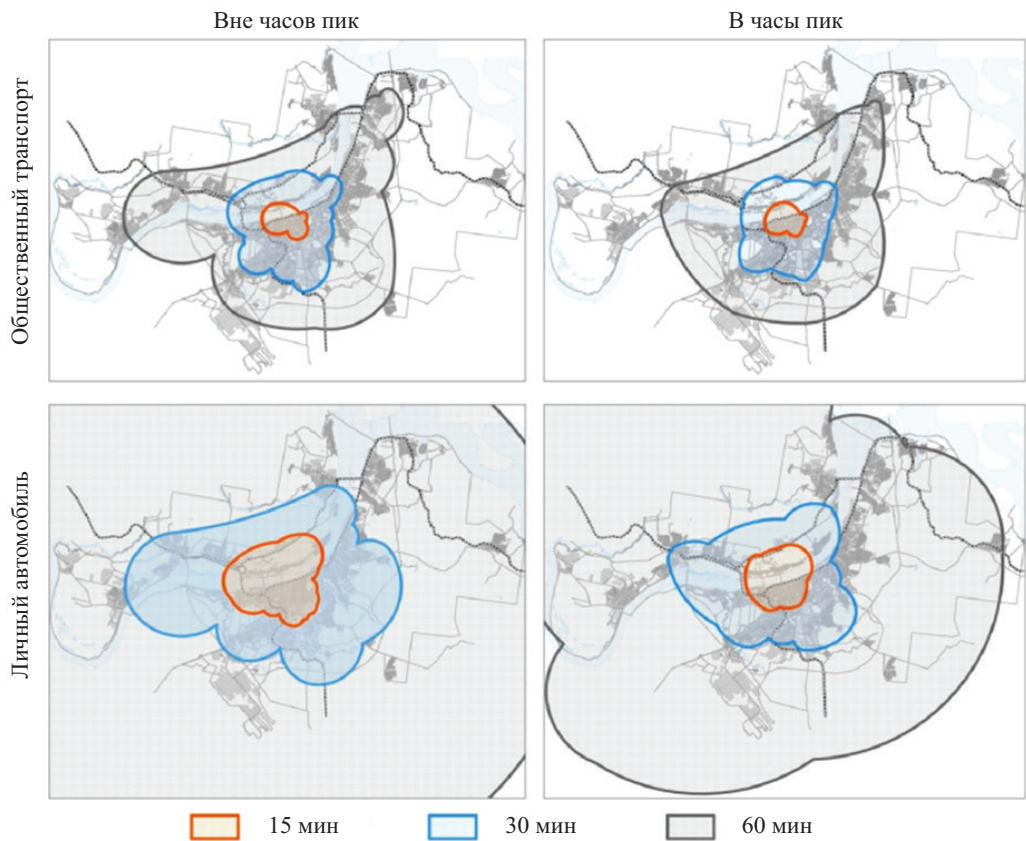


Рис. 2. Изохроны доступности территории г. Перми на общественном и личном транспорте для двух вариантов интенсивности движения [31]

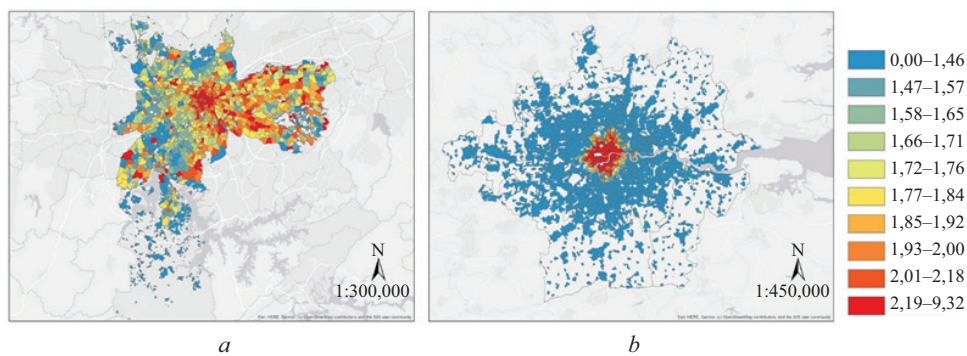


Рис. 3. Доступность рабочих мест в Сан-Паулу (a) и Лондоне (b) [34]

Существующее многообразие методов оценки транспортной доступности отражает различные исследовательские подходы — от экономико-географических до инженерно-технических. Однако в градостроительном контексте особую значимость приобретают именно те аспекты доступности, которые поддаются пространственному регулированию. Хотя транспортное поведение населения и уровень транспортной доступности определяются комплексом факторов, включая социально-экономические условия, транспортную политику и индивидуальные предпочтения, пространственная структура городской территории остается одним из немногих

параметров, на которые градостроительная практика может оказывать системное влияние.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние планировочной структуры на доступность

Современные исследования подчеркивают необходимость рассматривать транспортную доступность как результат взаимодействия транспортной инфраструктуры и планировочной организации городской среды. В частности, в докладе исследовательской группы LSE Cities акцентируется роль морфологических характеристик в обеспечении устойчивой мобильности [46]. Концепция доступ-

ности тесно связана с понятием «транспортное поведение населения» [6, 47]: именно она определяет возможности выбора направлений, способов и частоты поездок. Чем выше уровень доступности, тем выше вероятность использования общественного транспорта и немоторизованных видов мобильности, при условии наличия соответствующей инфраструктуры.

Исследования показывают, что такие пространственные характеристики, как плотность застройки, связность уличной сети и степень функционального смешения, оказывают прямое влияние на транспортное поведение [38], хотя их роль уступает социально-демографическим факторам, включая уровень автомобилизации и социально-экономический статус индивида [48]. Планировочная структура влияет на транспортное поведение опосредованно — через формирование условий доступности, что подчеркивает значимость градостроительных решений, направленных на сокращение расстояний до точек притяжения, повышение плотности и функциональной насыщенности городской ткани наряду с развитием транспортной инфраструктуры.

В научной литературе в области городского планирования доступность рассматривается как много-слойная категория, где одних только показателей расстояния и времени в пути недостаточно для объяснения различий в мобильности. Исследования 38 городов США показали, что именно пространственная организация, а не скорость перемещений, является ключевым фактором доступности [39]. Европейский опыт также демонстрирует интеграцию морфологических параметров: большинство из 21 инструмента оценки доступности, применяемых в практике транспортного и градостроительного планирования европейских городов, учитывают такие пространственные характеристики, как плотность, структура уличной сети и смешение функций [49]. Один из таких инструментов — GraBAM, основанный на гравитационных моделях, исполь-

зуется при разработке мастер-планов и оценке социально-экономических последствий транспортных проектов [50]. Таким образом, международная практика подтверждает необходимость перехода от сугубо транспортных моделей к комплексным подходам, интегрирующим морфологические, социальные и пространственные характеристики городской среды.

Пространственные характеристики планировочной структуры

Обзор научных публикаций позволяет выявить ключевые пространственные характеристики, определяющие уровень транспортной доступности: это конфигурация УДС, плотность застройки, пространственное распределение функций и точек притяжения. В таблице представлены основные морфологические параметры, наиболее часто рассматриваемые в научной литературе как предикторы пространственной доступности, и обозначен характер их влияния.

Повышение плотности застройки, особенно в сочетании с высокой концентрацией рабочих мест и сервисов, способствует сокращению расстояний между точками притяжения, снижает транспортную нагрузку и повышает эффективность общественного транспорта [39]. Исследования индийских городов показали, что компактная форма застройки, регулярная ортогональная сеть улиц и наличие субцентров занятости напрямую улучшают показатели доступности и обеспечивают более равномерное распределение транспортных потоков [51]. *Смешанная застройка*, сочетающая жилье, рабочие места, торговлю и услуги, снижает потребность в частых и дальних поездках, особенно на личном автомобиле [52].

Конфигурация улично-дорожной сети также играет определяющую роль. Связная сеть с высокой плотностью перекрестков и множеством альтернативных маршрутов повышает пешеходную и транспортную доступность, сокращает длину

Влияние пространственных характеристик городской среды на транспортную доступность

Характеристика	Влияние на доступность	Обоснование
Плотность населения и занятости	Уменьшает расстояния до объектов, делает общественный транспорт более эффективным	[39, 51]
Смещение функций	Повышает вероятность достижения необходимых целей без пересадок и на коротких маршрутах	[52, 53]
Связность уличной сети	Обеспечивает выбор маршрутов, уменьшает время и длину пути, увеличивает модальное разнообразие	[5, 54]
Проницаемость кварталов	Повышает доступность в масштабе пешеходной сети, особенно для маломобильных групп	[25]
Размеры кварталов	Более мелкая сетка кварталов способствует локальной доступности и пешей досягаемости	[46, 55]
Центральность в транспортной сети	Центрально расположенные районы обеспечивают больше альтернатив и быстрее достижимы из других точек	[24, 56]
Обеспеченность остановками и маршрутами общественного транспорта	Повышает физическую и временную доступность ключевых направлений, снижает барьеры для уязвимых групп	[53, 55]

пути и время поездки [5]. Топологическая связность УДС напрямую коррелирует с объемами пешеходных перемещений и концентрацией объектов притяжения вдоль наиболее доступных маршрутов [54]. Наличие сквозных связей между кварталами обеспечивает проницаемость городской ткани, что важно для уязвимых групп населения. Напротив, иерархическая организация уличной сети и закрытые жилые комплексы снижают проницаемость и ограничивают доступность [25, 46, 55].

Центральное положение участка в структуре города обеспечивает более высокий уровень доступности благодаря концентрации функций, транспортных маршрутов и пересадочных узлов. Например, исследование из г. Луисвилля выявило, что центральные районы города отличаются более высокой доступностью за счет сочетания эффективной уличной сети и концентрации точек притяжения [56]. Существенным фактором является и качество транспортного обслуживания: шаговая доступность остановок, плотность и частота маршрутов общественного транспорта. Интеграция транспортных маршрутов и развитие мультимодальных узлов способны повысить территориальную доступность прилегающих районов на 10–20 % [53]. В монографии Научно-исследовательского института автомобильного транспорта (НИИАТ) также подчеркивается, что шаговая доступность остановок общественного транспорта критически важна для снижения транспортной уязвимости [5].

Можно утверждать, что планировочная структура оказывает системное влияние на формирование условий транспортной доступности, сопоставимое по значимости с развитием транспортной инфраструктуры. Это подтверждает необходимость включения морфологических характеристик в ин-

струменты оценки и прогнозирования доступности городской среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что транспортную доступность следует рассматривать не только как характеристику транспортной системы, но и как производную от пространственной организации городской среды. Обзор научных работ подтверждает, что к числу наиболее значимых морфологических факторов относятся плотность и смешение функций, конфигурация УДС, размер и проницаемость кварталов, пространственное распределение точек притяжения.

Зарубежные исследования демонстрируют переход международной практики от оценки мобильности к комплексной оценке доступности, интегрирующей морфологические и социальные характеристики городской среды. В отечественном контексте актуальной задачей становится адаптация этих подходов с учетом особенностей постсоветской планировочной структуры, сформировавшейся в условиях индустриальной модели градостроительства.

Таким образом, дальнейшее развитие теоретико-методологических оснований оценки транспортной доступности должно быть связано с интеграцией морфологических характеристик в аналитические модели. Это позволит повысить чувствительность методов к пространственным различиям, выявить зоны транспортного неравенства и обосновать градостроительные решения, направленные на повышение качества городской среды и устойчивость городской мобильности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вучик В. Транспорт в городах, удобных для жизни : монография. М. : ИД Территория будущего, 2011. 576 с. EDN RAYWFL.
2. Cervero R. Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel: A Path Analysis // Journal of the American Planning Association. 2003. Vol. 69. Issue 2. Pp. 145–163. DOI: 10.1080/01944360308976303
3. Banister D. The sustainable mobility paradigm // Transport Policy. 2008. Vol. 15. Issue 2. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2007.10.005
4. Власов Д.Н., Данилина Н.В. Концепции устойчивого развития территорий // Архитектура и строительство России. 2023. № 2 (246). С. 8–9.
5. Донченко В.В., Баранов А.С., Немчинов Д.М., Поляков А.С. Городское планирование и транспортное поведение в Российской Федерации : монография. М. : КнигИздат, 2022. 240 с.
6. Савельева Е.О. Изменение транспортного поведения населения как способ достижения устойчивой мобильности в российских городах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2021. № 1 (41). С. 5–18. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.01. EDN NHPBNB.
7. Бахирев И.А. Транспортные проблемы современного города // Градостроительство. 2016. № 2 (42). С. 12–19. EDN VZVLJH.
8. Савельева Е.О. Устойчивая мобильность и (дез) интеграция развития систем городского землепользования и транспорта в городах России // Урбанистика. 2024. № 2. С. 130–140. DOI: 10.7256/2310-8673.2024.2.70422. EDN AMXMKF.
9. Щербина Е.В., Данилина Н.В. Градостроительные аспекты проектирования устойчивой городской

среды // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11 (94). С. 183–186. EDN TALHUN.

10. Гребенников В.В., Мунин Д.А., Левашиев А.Г., Михайлов А.Ю. Виды транспортной доступности // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2012. № 1 (2). С. 56–61. EDN RAQTTEX.

11. Дубовик В.О. Методы оценки транспортной доступности территории // Региональные исследования. 2013. № 4 (42). С. 11–18. EDN RUDVDF.

12. Тиньков С.А. Подходы к оценке транспортной доступности точек притяжения в мегаполисе // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. № 2. С. 377–394. DOI: 10.18334/epp.11.2.111582. EDN VBRXOS.

13. Бугроменко В.Н. Транспорт в территориальных системах. М. : Наука, 1987. 110 с.

14. Баранский Н.Н. Становление советской экономической географии : избранные труды. М. : Мысль, 1980. 287 с.

15. Колосовский Н.Н. Избранные труды. Смоленск : Ойкумена, 2006. 334 с.

16. Спирин И.В., Беляев В.М. Содержание понятия транспортной доступности // Мир Транспорта. 2018. Т. 16. № 5 (78). С. 26–38. EDN JXEVGA.

17. Аникина Е.А., Лазарчук Е.В., Чечина В.И. Доступность высшего образования как социально-экономическая категория // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–2. С. 355–358. EDN TENFKX.

18. Еругина М.В., Кром И.Л., Шмеркевич А.Б., Дорогойкин Д.Л., Жужлова Н.Ю., Шигаев Н.Н. и др. Доступность медицинской помощи как облигатный социальный предиктор здоровья населения в России // Саратовский научно-медицинский журнал. 2016. Т. 12. № 2. С. 101–105. EDN WZXGRL.

19. Наберушкина Э.К. Доступность городской среды для инвалидов // Социологические исследования. 2010. № 9 (317). С. 58–64. EDN MULYWP.

20. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта PTV «Visum» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1 (4). С. 133–138. EDN RAJBXJ.

21. Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. М. : Логос, 2013. 188 с. EDN RXRQZV.

22. Бугроменко В.Н. Что стоит за сменой парадигм? // Транспорт России. 2009. № 46. С. 5–18.

23. Curtis C., Scheurer J. Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making // Progress in Planning. 2010. Vol. 74. Issue 2. Pp. 53–106. DOI: 10.1016/j.progress.2010.05.001

24. Geurs K.T., van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions // Journal of Transport Geography. 2004.

Vol. 12. Issue 2. Pp. 127–140. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

25. Handy S.L., Niemeier D.A. Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives // Environment and Planning A: Economy and Space. 1997. Vol. 29. Issue 7. Pp. 1175–1194. DOI: 10.1068/a291175

26. Handy S. Is accessibility an idea whose time has finally come? // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020. Vol. 83. P. 102319. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102319

27. Hillier B., Hanson J. The social logic of space. Cambridge University Press, 1989.

28. Бегай Е.Д., Смолина О.О. Особенности и перспективы проведения конфигурационного анализа на территории застройки г. Новосибирска с использованием программного обеспечения Depthmap // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 57–71. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-57-71. EDN RJLSSD.

29. Овчинникова Е.А., Савельева Е.О. Пространственный анализ и оптимизация планировочной структуры малого города на примере г. Горнозаводск // Архитектура и современные информационные технологии. 2022. № 2 (59). С. 245–257. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-245-257. EDN MXJOAU.

30. Синецына И.А. Грамматика городского пространства: планировочные оси и сопряженные оценки территории // Архитектура и современные информационные технологии. 2023. № 1 (62). С. 197–212. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-197-212. EDN NAAHTV.

31. Савельева Е.О. Рельсовый транспорт в постсоветских городах с линейно-расчлененной планировочной структурой (на примере г. Перми) // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 1 (21). С. 101–119. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.01.07. EDN VPMTD.

32. Жужгова Ю.Е., Савельева В.В. Формирование оптимальной логистической системы на основе анализа транспортной инфраструктуры города Екатеринбурга // Инновационный транспорт. 2021. № 2 (40). С. 3–7. DOI: 10.20291/2311-164X-2021-2-3-7. EDN DAMMBN.

33. Hansen W.G. How Accessibility Shapes Land Use // Journal of the American Institute of Planners. 1959. Vol. 25. Issue 2. Pp. 73–76. DOI: 10.1080/01944-365908978307

34. Giannotti M., Tomasiello D.B., Bittencourt T.A., Giannotti M. The bias in estimating accessibility inequalities using gravity-based metrics // Journal of Transport Geography. 2022. Vol. 101. P. 103337. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103337

35. Geurs K., van Eck J.R. Accessibility measures: review and applications. RIVM Report. 2001.

36. Shen Q. Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers // Environment and Planning B: Planning

and Design. 1998. Vol. 25. Issue 3. Pp. 345–365. DOI: 10.1068/b250345

37. *Van Wee B., Hagoort M., Annema J.A.* Accessibility measures with competition // *Journal of Transport Geography*. 2001. Vol. 9. Issue 3. Pp. 199–208. DOI: 10.1016/s0966-6923(01)00010-2

38. *Handy S.L., Niemeier D.A.* Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1997. Vol. 29. Issue 7. Pp. 1175–1194. DOI: 10.1068/a29-1175

39. *Levine J., Grengs J., Shen Q., Shen Q.* Does Accessibility Require Density or Speed? // *Journal of the American Planning Association*. 2012. Vol. 78. Issue 2. Pp. 157–172. DOI: 10.1080/01944363.2012.677119

40. *Fortin P., Morency C., Trépanier M.* Innovative GTFS data application for transit network analysis using a graph-oriented method // *Journal of Public Transportation*. 2016. Vol. 19. Issue 4. Pp. 18–37. DOI: 10.5038/2375-0901.19.4.2

41. *Wessel N., Farber S.* On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility // *Journal of Transport and Land Use*. 2019. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.5198/jtlu.2019.1502

42. *Hägerstrand T.* What about people in regional science? // *Transport Sociology*. 1986. Pp. 143–158. DOI: 10.1016/b978-0-08-023686-5.50017-1

43. *Kwan M.* Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework // *Geographical Analysis*. 1998. Vol. 30. Issue 3. Pp. 191–216. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x

44. *Kim J., Lee B.* More than travel time: New accessibility index capturing the connectivity of transit services // *Journal of Transport Geography*. 2019. Vol. 78. Pp. 8–18. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.05.008

45. *Rathod R., Joshi G., Arkatkar S.* Composite Accessibility Index: A Novel and Holistic Measure for Evaluating Transit Accessibility // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2025. Vol. 2679. Issue 2. Pp. 1359–1378. DOI: 10.1177/03611981241270156

46. *Rode P., Floater G., Thomopoulos N., Docherty J., Schwinger P., Mahendra A. et al.* Accessibility in Cities: Transport and Urban Form // *Lecture Notes*

in Mobility. 2017. Pp. 239–273. DOI: 10.1007/978-3-319-51602-8_15

47. *Федоров В.А.* Транспортное поведение индивидуумов — основной источник городских транспортных проблем // *Молодой ученый*. 2015. № 18 (98). С. 309–316. EDN UJLUSL.

48. *Савельева Е.О.* Факторы формирования транспортного поведения в крупнейших городах России // *Градостроительство*. 2018. № 5 (57). С. 54–62. EDN IIVGDL.

49. *Papa E., Silva C., Brömmelstroet M.T., Hull A.* Accessibility instruments for planning practice: a review of European experiences // *Journal of Transport and Land Use*. 2015. Vol. 9. Issue 3. Pp. 57–75. DOI: 10.5198/jtlu.2015.585

50. *Papa E., Coppola P.* Gravity-based accessibility measures for integrated transport-land use planning (GraBAM) // *Accessibility Instruments for Planning Practice*. 2012. Pp. 117–124.

51. *Harari M.* Cities in bad shape: Urban geometry in India // *American Economic Review*. 2020. Vol. 110. Issue 8. Pp. 2377–2421. DOI: 10.1257/aer.20171673

52. *Cervero R., Duncan M.* Which Reduces Vehicle Travel More: Jobs-Housing Balance or Retail-Housing Mixing? // *Journal of the American Planning Association*. 2006. Vol. 72. Issue 4. Pp. 475–490. DOI: 10.1080/01944360608976767

53. *Liu S., Zhu X.* Accessibility Analyst: An Integrated GIS Tool for Accessibility Analysis in Urban Transportation Planning // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004. Vol. 31. Issue 1. Pp. 105–124. DOI: 10.1068/b305

54. *Koohsari M.J., Owen N., Cerin E., Giles-Corti B., Sugiyama T.* Walkability and walking for transport: characterizing the built environment using space syntax // *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2016. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1186/s12966-016-0448-9

55. *Litman T.A.* Evaluating Accessibility for Transport Planning // *Victoria Transport Policy Institute*. 2025. URL: <https://www.vtpi.org/access.pdf>

56. *Scott D.M., Horner M.W.* The role of urban form in shaping access to opportunities: An exploratory spatial data analysis // *Journal of Transport and Land Use*. 2008. Vol. 1. Issue 2. Pp. 89–119.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Екатерина Олеговна Савельева** — PhD, старший преподаватель кафедры архитектуры и урбанистики; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e.saveleva@pstu.ru.

INTRODUCTION

For a long time, transport policy in cities has been focused on ensuring effective mobility, understood as maximizing speed and distance of travel. This approach has led to increased car use, spatial dispersion and a decline in the quality of the urban environment [1, 2]. The transition to a sustainable development paradigm in the 1990s shifted the focus from mobility to accessibility, i.e. the ability to achieve vital goals within acceptable time and resource costs [3, 4]. Accessibility came to be seen not only as a transport characteristic, but also as an integral indicator reflecting the conditions of the urban environment and its ability to meet the needs of the population [5, 6].

In Russian politics, the idea of accessibility has been institutionalized relatively recently: Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 sets out, for the first time at the state level, the task of improving spatial connectivity and transport accessibility of territories¹. However, the Strategy interprets accessibility primarily in sectoral terms — through the renewal of rolling stock, the development of trunk infrastructure, and the improvement of transport service indicators. Issues of transport and land use integration remain secondary, and the urban planning aspect of accessibility is not adequately reflected. In modern Russian cities, the disintegration of land use and transport systems persists; the location of residential areas, workplaces and services is often not consistent with the possibilities of reaching them [5, 7, 8]. This results in spatial imbalances that increase dependence on private transport and reduce territorial equity. Ensuring a sustainable urban environment requires a comprehensive urban planning approach that includes coordinated planning of the spatial organization of the territory and transport infrastructure [9].

The current scientific and practical agenda involves a shift from understanding transport accessibility as an exclusively transport characteristic to considering it as a comprehensive urban planning indicator. In this regard, the systematization of the conceptual framework, analysis of existing scientific approaches to measuring transport accessibility, and research into the role of spatial characteristics of the urban environment in shaping transport accessibility conditions are becoming particularly relevant.

Theoretical approaches to the analysis of transport accessibility

The concept of accessibility

The concept of accessibility occupies an important place in the theory and practice of several related disciplines: geography, regional economics, transport plan-

ning and urban planning. In a broad interdisciplinary context, accessibility can be viewed as a characteristic of a territory that indicates the degree (potential and actual) of reachability of a specific point in space by selected means [10–12]. In the economic-geographical tradition, accessibility is understood as the property of remoteness/proximity of an object or the possibility of reaching it via the existing transport network [13], or as a tool for analyzing the isolation of territories and development disparities [13–15].

In the field of urban development and spatial planning, transport accessibility has become established as a normative spatial characteristic linked to the service radii of social infrastructure facilities, as well as to the walking distance to stops and transfer hubs [16]. Research on social policy and applied demography interprets accessibility as the equality of opportunities for the population to achieve basic social benefits — education, medicine, administrative services — as well as an indicator of transport discrimination [17–19]. In transport engineering modelling, the concept is used primarily in an operational sense — as temporal and spatial parameters of access to the transport network or key facilities [20, 21]. Even when implementing complex algorithms for calculating transport flows, the concept of accessibility often does not act as an independent analytical category, but merely accompanies traditional mobility indicators.

Thus, despite the universality of the term “accessibility”, its meaning and assessment methodology vary significantly depending on the disciplinary context. In Russian practice, interpretations remain fragmented: the category of accessibility has been most fully developed in socio-economic geography, partially established in urban planning and social policy, but remains insufficiently integrated into urban planning. This hinders the formation of a unified methodological basis and highlights the task of adapting international approaches to domestic conditions.

In this study, transport accessibility for urban planning analysis is understood as an integral characteristic of the urban environment that reflects the total reachability of spatially distributed opportunities (jobs/services/infrastructure) by the population at a given generalized cost of reaching them via the actual transport network (whereby the weighting of opportunities and travel costs are determined by the configuration of the network and the morphology of the urban environment).

The evolution of transport accessibility assessment methods

The evolution of approaches to assessing transport accessibility has progressed from the early models of the Soviet economic-geographical school, which relied on indicators such as road network density and infrastructure provision coefficients [13–15], to modern comprehensive methods based on big data and focused on actual user behaviour [12]. The Soviet school laid a solid theoretical foundation, but its approaches had

¹ Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035: approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated 27 November 2021.

a number of limitations: the emphasis on the macro level made it difficult to apply the results on an urban scale, and the static indicators used did not reflect the dynamic nature of accessibility in a highly urbanized environment. In the 1990s and 2000s, Russian research shifted towards taking into account passenger flows and the territorial organization of cities. In recent years, methods based on big data, digital mobility traces and user behaviour characteristics have been increasingly implemented in practice. This transition reflects a global trend towards understanding accessibility as a multifactorial category that takes into account not only transport but also social, spatial and environmental dimensions.

Despite the continued interest in the concept of accessibility on the part of Russian geographers [11, 13, 22] and the active development of this topic in international scientific literature in the field of urban studies and urban planning [23–25], in Russian urban planning theory and practice, the concept of accessibility remains insufficiently developed and systematized. At the applied level in Russian cities, accessibility is still assessed mainly within the framework of basic route analysis for master plans and comprehensive transport planning schemes. This is significantly inferior to foreign approaches, where transport accessibility is considered one of the key indicators of social justice, sustainable development, spatial integration, and the effectiveness of urban structure [26].

Contemporary interpretations in both domestic and foreign scientific works increasingly define transport accessibility as a multi-parameter category that includes physical, temporal, economic, social, and environmental characteristics. However, there is still no universal term for it, which leads to variability in the methods and criteria used to assess it [11].

MATERIALS AND METHODS

To systematize existing approaches to assessing transport accessibility in the context of urban planning, a classification comprising seven groups of methods has been developed. The classification is based on their suitability for the tasks of analyzing and designing the urban environment, as well as differences in mathematical apparatus and degree of suitability for practical application — from topological models to integral indices that take into account morphological and social characteristics.

Topological methods are based on the analysis of the street and road network (SRN) structure in graph form. They allow key nodes and traffic directions to be identified, which is important when designing new connections. The most well-known method is Space Syntax, developed by B. Hiller and J. Hanson [27], which has been widely used in the analysis of cities of various sizes [28–30] (Fig. 1). Despite its versatility and widespread use, this approach is limited in that it ignores time

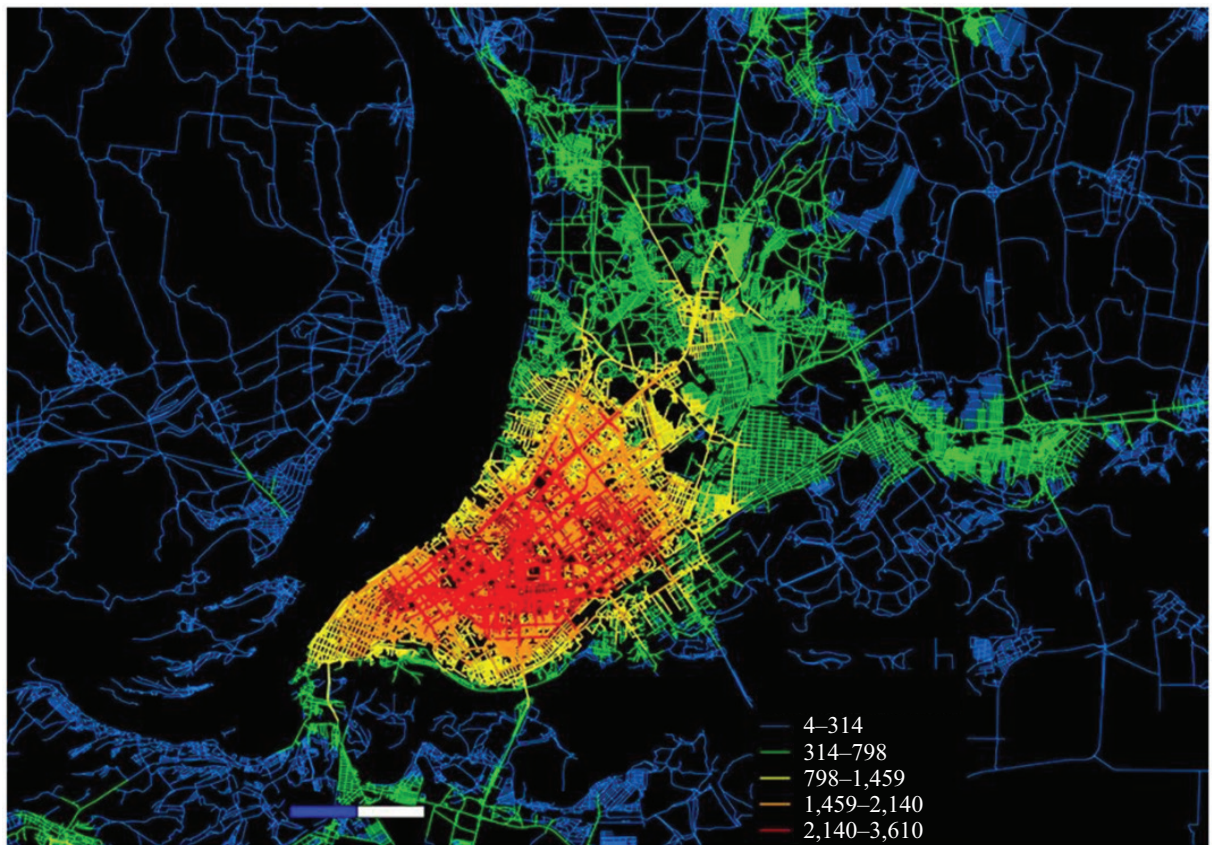


Fig. 1. Connectivity of the Samara region according to spatial syntax theory [30]

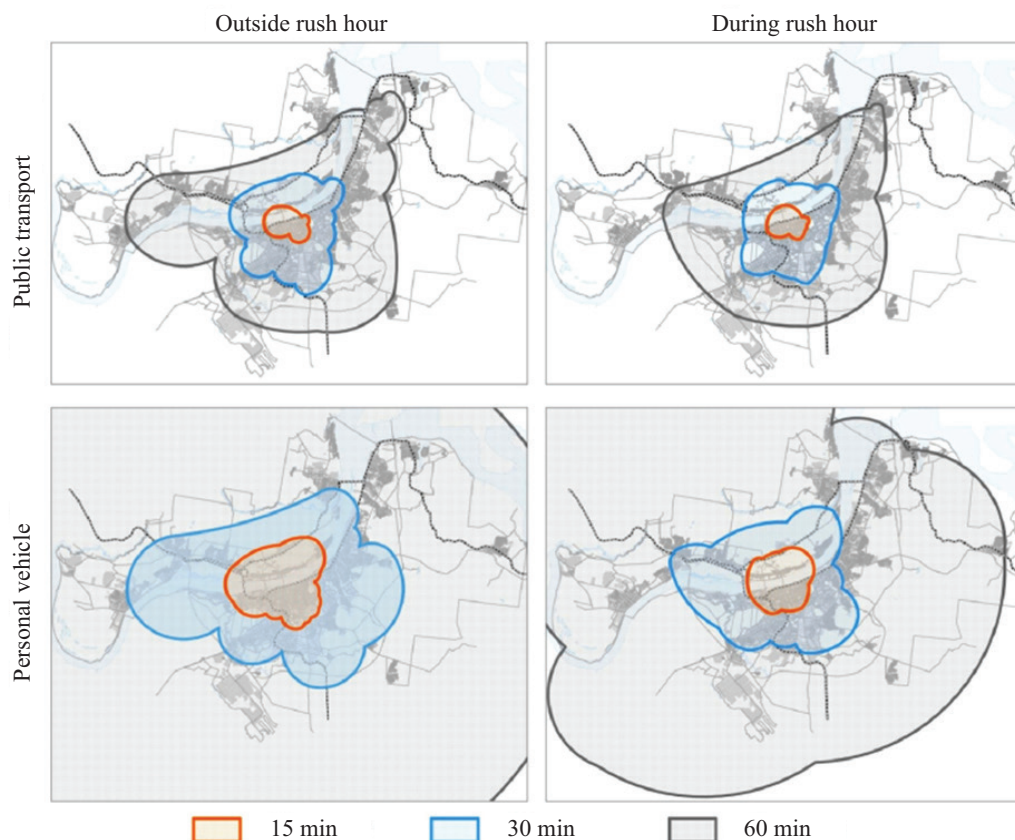


Fig. 2. Isochrones of accessibility of the Perm area by public and private transport for two traffic intensity scenarios [31]

and cost parameters, which are key to assessing real transport accessibility.

Iso line methods allow visualizing the boundaries of a territory's accessibility in the form of isochrones (by time), isodistances (by distance) and isodapanes (by travel cost). Their advantage lies in their clarity, which makes these methods particularly useful when assessing the accessibility radii of social infrastructure facilities and transport hubs. Domestic authors have used isochrones, for example, to analyze the transport accessibility of the Perm region [31] (Fig. 2). In addition, isodistances and the so-called “kilometrograms” of A.M. Yakshin, used for graphoanalytical assessment of spatial differences, have become widespread in the domestic scientific tradition [32].

Potential accessibility methods are based on gravitational models proposed by V.G. Hansen [33]. They take into account the “attractiveness” of destinations and the costs of reaching them, which allows for the assessment of the balance of spatial development. Their application has proven highly effective in analyzing workplace accessibility [34], but the models have been criticized for ignoring the impact of competition for resources [35, 36]. Modified indicators and *balance models* have been developed to take this method into account [11, 37]. It should be noted that in domestic practice, gravitational models have become established mainly as part of four-stage transport modelling, where they are used to calculate cor-

respondences and forecast flows. In international tradition, they are interpreted more broadly — as a tool for assessing transport demand and, at the same time, as an indicator of spatial accessibility used in urban planning analysis [38, 39] (Fig. 3).

Infrastructure-network, spatio-temporal, and index methods are developing in the context of digitalization. The former is based on GTFS data (a publicly available format for describing public transport timetables) and graph databases [40, 41]. They allow for the consideration of timetables and the actual dynamics of transport services, which makes them useful for optimizing routes and planning transport hubs. A limitation is their dependence on the completeness and reliability of the source data.

Spatio-temporal methods, which go back to T. Hegerstrand's concept [42], focus on individual constraints and mobility trajectories; using these navigation systems and travel diaries makes it possible to identify interpersonal differences and provides a more accurate reflection of urban mobility dynamics [43]. Their advantage lies in their high accuracy, while their limitation is the complexity of collecting and processing personal data.

Composite indices are constructed using multi-criteria procedures and machine learning [44, 45], which allows for the identification of imbalances between network coverage and the actual conditions for

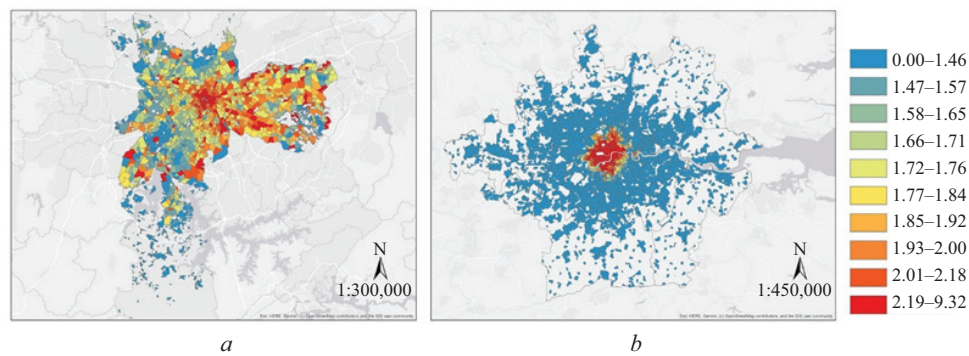


Fig. 3. Accessibility of workplaces in Sao Paulo (a) and London (b) [34]

achieving goals. These approaches are particularly useful in scenario modelling, but the interpretation of such indices is difficult, and their use requires significant amounts of information. At the same time, it is this class of methods that opens up prospects for integrating the morphological characteristics of the urban environment into models for assessing transport accessibility and applying neural network algorithms capable of taking into account nonlinear dependencies between the planning structure and the actual level of accessibility. This approach will make it possible to adapt international experience to the specifics of post-Soviet cities and increase the sensitivity of analytical tools to spatial differences within the urban fabric.

The existing variety of methods for assessing transport accessibility reflects different research approaches, ranging from economic and geographical to engineering and technical. However, in the context of urban planning, it is precisely those aspects of accessibility that can be spatially regulated that are of particular importance. Although the transport behaviour of the population and the level of transport accessibility are determined by a complex set of factors, including socio-economic conditions, transport policy and individual preferences, the spatial structure of urban areas remains one of the few parameters on which urban planning practice can have a systematic influence.

RESEARCH RESULTS

The impact of planning structure on accessibility

Contemporary research emphasizes the need to consider transport accessibility as the result of the interaction between transport infrastructure and the planning of the urban environment. In particular, a report by the LSE Cities research group highlights the role of morphological characteristics in ensuring sustainable mobility [46]. The concept of accessibility is closely linked to the concept of “transport behaviour of the population” [6, 47]: it is this concept that determines the choice of destinations, modes and frequency of travel. The higher the level of accessibility, the higher the likelihood of using public transport and non-motorized modes of mobility, provided that the appropriate infrastructure is in place.

Studies show that spatial characteristics such as building density, street network connectivity and the degree of functional mixing have a direct impact on transport behaviour [38], although their role is secondary to socio-demographic factors, including car ownership and an individual’s socio-economic status [48]. The planning structure influences transport behaviour indirectly — through the creation of accessibility conditions, which emphasizes the importance of urban planning decisions aimed at reducing distances to points of attraction, increasing the density and functional saturation of the urban fabric, and developing transport infrastructure.

In the scientific literature on urban planning, accessibility is viewed as a multi-layered category, where distance and travel time indicators alone are not sufficient to explain differences in mobility. Studies of 38 cities in the United States have shown that it is spatial organization, rather than travel speed, that is the key factor in accessibility [39]. European experience also demonstrates the integration of morphological parameters: most of the 21 accessibility assessment tools used in the transport and urban planning practices of European cities take into account spatial characteristics such as density, street network structure and mixed use [49]. One such tool is GraBAM, based on gravity models, which is used in the development of master plans and the assessment of the socio-economic impact of transport projects [50]. Thus, international practice confirms the need to move from purely transport models to integrated approaches that incorporate the morphological, social and spatial characteristics of the urban environment.

Spatial characteristics of the planning structure

A review of scientific publications reveals the key spatial characteristics that determine the level of transport accessibility: the configuration of the urban development structure, building density, and the spatial distribution of functions and points of attraction. The Table presents the main morphological parameters most frequently considered in scientific literature as predictors of spatial accessibility, and indicates the nature of their influence.

The influence of spatial characteristics of the urban environment on transport accessibility

Characteristic	Impact on accessibility	Justification
Population and employment density	Reduces distances to facilities and increases the efficiency of public transport	[39, 51]
Land use mix	Increases the likelihood of reaching required destinations without transfers and along short routes	[52, 53]
Street network connectivity	Provides route choice, reduces travel time and distance, and increases modal diversity	[5, 54]
Block permeability	Increases accessibility at the pedestrian network scale, especially for groups with limited mobility	[25]
Block size	Smaller block grids promote local accessibility and walkability	[46, 55]
Transport network centrality	Centrally located areas provide more alternatives and are reached faster from other locations	[24, 56]
Availability of public transport stops and routes	Improves physical and temporal accessibility of key destinations and reduces barriers for vulnerable groups	[53, 55]

Increased building density, especially when combined with a high concentration of jobs and services, helps to reduce the distances between points of attraction, reduces transport loads and improves the efficiency of public transport [39]. Studies of Indian cities have shown that compact building forms, regular orthogonal street networks, and the presence of sub-centres of employment directly improve accessibility indicators and ensure a more even distribution of traffic flows [51]. *Mixed-use development,* combining housing, workplaces, retail and services, reduces the need for frequent and long journeys, especially by private car [52].

The configuration of the street and road network also plays a decisive role. A connected network with a high density of intersections and multiple alternative routes improves pedestrian and transport accessibility, reduces travel distances and travel times [5]. The topological connectivity of the SRN directly correlates with pedestrian traffic volumes and the concentration of attractions along the most accessible routes [54]. *The presence of through connections* between neighbourhoods ensures the permeability of the urban fabric, which is important for vulnerable population groups. Conversely, the hierarchical organization of the street network and gated communities reduce permeability and limit accessibility [25, 46, 55].

The central location of the site within the city structure ensures a higher level of accessibility due to the concentration of functions, transport routes and transfer hubs. For example, a study from Louisville found that central areas of the city are more accessible due to a combination of an efficient street network and a concentration of points of attraction [56]. *The quality of transport services* is also an important factor: walking distance to stops, density and frequency of public transport routes. The integration of transport routes and the development of multimodal hubs can increase the territorial accessibility of adjacent areas by 10–20 % [53]. A monograph by

the Scientific Research Institute of Automobile Transport (NIIAT) also emphasizes that walking distance to public transport stops is critical for reducing transport vulnerability [5].

It can be argued that the planning structure has a systemic impact on the formation of transport accessibility conditions, comparable in importance to the development of transport infrastructure. This confirms the need to include morphological characteristics in the tools for assessing and forecasting the accessibility of the urban environment.

CONCLUSION

The analysis shows that transport accessibility should be considered not only as a characteristic of the transport system, but also as a derivative of the spatial organization of the urban environment. A review of scientific works confirms that the most significant morphological factors include density and mixing of functions, the configuration of the SRN, the size and permeability of neighbourhoods, and the spatial distribution of points of attraction.

Foreign studies demonstrate a shift in international practice from assessing mobility to a comprehensive assessment of accessibility that integrates the morphological and social characteristics of the urban environment. In the domestic context, the urgent task is to adapt these approaches, taking into account the peculiarities of the post-Soviet planning structure that was formed under the conditions of the industrial model of urban development.

Thus, the further development of the theoretical and methodological foundations for assessing transport accessibility should be linked to the integration of morphological characteristics into analytical models. This will increase the sensitivity of methods to spatial differences, identify areas of transport inequality, and justify urban planning decisions aimed at improving the quality of the urban environment and the sustainability of urban mobility.

REFERENCES

1. Vuchik V. *Transport in cities convenient for living : monograph*. Moscow, ID Territory of the Future, 2011; 576. EDN RAYWFL. (rus.).
2. Cervero R. Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel: A Path Analysis. *Journal of the American Planning Association*. 2003; 69(2):145-163. DOI: 10.1080/01944360308976303
3. Banister D. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*. 2008; 15(2):73-80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2007.10.005
4. Vlasov D.N., Danilina N.V. Concepts of sustainable territorial development. *Architecture and construction of Russia*. 2023; 2(246):8-9. (rus.).
5. Donchenko V.V., Baranov A.S., Nemchinov D.M., Polyakov A.S. *Urban planning and transport behavior in the Russian Federation : monograph*. Moscow, KnigIzdat, 2022; 240. (rus.).
6. Saveleva E. Managing travel behavior of the population as a way to achieve sustainable mobility in Russian cities. PNRPU Bulletin. *Urban development*. 2021; 1(41):5-18. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.01. EDN NHPBNB. (rus.).
7. Bakhirev I.A. Transport problems of modern city Transport problems of the modern city. *Urban Development*. 2016; 2(42):12-19. EDN VZVLJH. (rus.).
8. Saveleva E.O. Sustainable mobility and (de)integration of land use and transportation development in Russian cities. *Urban Studies*. 2024; 2:130-140. DOI: 10.7256/2310-8673.2024.2.70422. EDN AMXMKF. (rus.).
9. Shcherbina E., Danilina N. Town planning aspects of designing sustainable urban environment. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014; 11(94): 183-186. EDN TALHUH. (rus.).
10. Grebennikov V.V., Munin D.A., Levashev A.G., Mikhailov A.Yu. The types of transport availability. Proceedings of Universities. Investment. *Construction. Real estate*. 2012; 1(2):56-61. EDN RAQTEX. (rus.).
11. Dubovik V.O. Methods for assessing the transport accessibility of a territory. *Regional studies*. 2013; 4(42):11-18. EDN RUDVDF. (rus.).
12. Tinkov S.A. Approaches to assessing transport accessibility of attraction points in a metropolis. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2021; 11(2):377-394. DOI: 10.18334/ep.11.2.111582. EDN VBRXOS. (rus.).
13. Bugromenko V.N. *Transport in territorial systems*. Moscow, Nauka, 1987; 110. (rus.).
14. Baransky N.N. *Formation of Soviet economic geography: selected works*. Moscow, Mysl, 1980; 287. (rus.).
15. Kolosovsky N.N. *Selected Works*. Smolensk, Oikumena, 2006; 334. (rus.).
16. Spirin I.V., Belyaev V.M. Content of transport accessibility concept. *World of Transport and Transportation*. 2018; 16(5):(78):26-38. EDN JXEVG. (rus.).
17. Anikina E.A., Lazarchuk E.V., Chechina V.I. Accessibility of higher education as a socio-economic category. *Fundamental Research*. 2014; 12-2:355-358. EDN TENFKX. (rus.).
18. Yerugina M.V., Krom I.L., Shmerkevich A.B., Dorogoykin D.L., Zhuzhlova N.Yu., Shigaev N. et al. The availability of medical care as an obligatory social health predictor of the population in Russia. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2016; 12(2):101-105. EDN WZXGRL. (rus.).
19. Naberushkina E.K. Accessibility of the urban environment for people with disabilities. *Sociological Studies*. 2010; 9(317):58-64. EDN MULYWP. (rus.).
20. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Duchenkova A.V. Example of transport accessibility evaluation using PTV “Visum” software. Proceedings of Universities. Investment. *Construction. Real Estate*. 2013; 1(4):133-138. EDN RAJBXJ. (rus.).
21. Yakimov M.R. *Transport planning: creating transport models of cities*. Moscow, Logos, 2013; 188. EDN RXRQZV. (rus.).
22. Bugromenko V.N. What is behind the paradigm shift? *Transport of Russia*. 2009; 46:5-18. (rus.).
23. Curtis C., Scheurer J. Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making. *Progress in Planning*. 2010; 74(2):53-106. DOI: 10.1016/j.progress.2010.05.001
24. Geurs K.T., van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions. *Journal of Transport Geography*. 2004; 12(2):127-140. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005
25. Handy S.L., Niemeier D.A. Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives. *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1997; 29(7):1175-1194. DOI: 10.1068/a291175
26. Handy S. Is accessibility an idea whose time has finally come? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020; 83:102319. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102319
27. Hillier B., Hanson J. *The social logic of space*. Cambridge University Press, 1989.
28. Begey E.D., Smolina O.O. Configurational analysis of Novosibirsk's development area using depth map software. *Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(4):57-71. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-57-71. EDN RJJLSSD. (rus.).
29. Ovchinnikova E.A., Saveleva E.O. Spatial analysis and optimization of the urban structure in small towns. The case study of Gornozavodsk, Russia. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022; 2(59):245-257. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-245-257. EDN MXJOAU. (rus.).
30. Sinitsyna I.A. Grammar of urban space: planning axes and associated areas assessment. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023; 1(62):197-212. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-197-212. EDN NAAHTV. (rus.).
31. Saveleva E. Rail transport in post-soviet cities with fragmented urban form (the case study of Perm). PNRPU

- Bulletin. *Urban development*. 2016; 1(21):101-119. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.01.07. EDN VPMTD. (rus.).
32. Zhuzhgov Yu.E., Savel'eva V.V. Formation of an optimal logistics system based on the analysis of transport infrastructure of the city of Yekaterinburg. *Innotrans*. 2021; 2(40):3-7. DOI: 10.20291/2311-164X-2021-2-3-7. EDN DAMMBN. (rus.).
33. Hansen W.G. How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*. 1959; 25(2):73-76. DOI: 10.1080/01944365908978307
34. Giannotti M., Tomasiello D.B., Bittencourt T.A., Giannotti M. The bias in estimating accessibility inequalities using gravity-based metrics. *Journal of Transport Geography*. 2022; 101:103337. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103337
35. Geurs K., van Eck J.R. Accessibility measures: review and applications. *RIVM Report*. 2001.
36. Shen Q. Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1998; 25(3):345-365. DOI: 10.1068/b250345
37. Van Wee B., Hagoort M., Annema J.A. Accessibility measures with competition. *Journal of Transport Geography*. 2001; 9(3):199-208. DOI: 10.1016/s0966-6923(01)00010-2
38. Handy S.L., Niemeier D.A. Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives. *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1997; 29(7):1175-1194. DOI: 10.1068/a291175
39. Levine J., Grengs J., Shen Q., Shen Q. Does Accessibility Require Density or Speed? *Journal of the American Planning Association*. 2012; 78(2):157-172. DOI: 10.1080/01944363.2012.677119
40. Fortin P., Morency C., Trépanier M. Innovative GTFS data application for transit network analysis using a graph-oriented method. *Journal of Public Transportation*. 2016; 19(4):18-37. DOI: 10.5038/2375-0901.19.4.2
41. Wessel N., Farber S. On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. *Journal of Transport and Land Use*. 2019; 12(1). DOI: 10.5198/jtlu.2019.1502
42. Hägerstrand T. What about people in regional science? *Transport Sociology*. 1986; 143-158. DOI: 10.1016/b978-0-08-023686-5.50017-1
43. Kwan M. Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework. *Geographical Analysis*. 1998; 30(3):191-216. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x
44. Kim J., Lee B. More than travel time: New accessibility index capturing the connectivity of transit services. *Journal of Transport Geography*. 2019; 78:8-18. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.05.008
45. Rathod R., Joshi G., Arkatkar S. Composite Accessibility Index: A Novel and Holistic Measure for Evaluating Transit Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2025; 2679(2):1359-1378. DOI: 10.1177/03611981241270156
46. Rode P., Floater G., Thomopoulos N., Docherty J., Schwinger P., Mahendra A. et al. Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. *Lecture Notes in Mobility*. 2017; 239-273. DOI: 10.1007/978-3-319-51602-8_15
47. Fedorov V.A. Individual transport behaviour as the main source of urban transport problems. *Young Scientist*. 2015; 18(98):309-316. EDN UJLUSL. (rus.).
48. Savelyeva E.O. The factors of transportation behavior in the major cities of Russia. *Urban Development*. 2018; 5(57):54-62. EDN IIVGDL. (rus.).
49. Papa E., Silva C., Brömmelstroet M.T., Hull A. Accessibility instruments for planning practice: a review of European experiences. *Journal of Transport and Land Use*. 2015; 9(3):57-75. DOI: 10.5198/jtlu.2015.585
50. Papa E., Coppola P. Gravity-based accessibility measures for integrated transport-land use planning (GraBAM). *Accessibility Instruments for Planning Practice*. 2012; 117-124.
51. Harari M. Cities in bad shape: Urban geometry in India. *American Economic Review*. 2020; 110(8):2377-2421. DOI: 10.1257/aer.20171673
52. Cervero R., Duncan M. Which Reduces Vehicle Travel More: Jobs-Housing Balance or Retail-Housing Mixing? *Journal of the American Planning Association*. 2006; 72(4):475-490. DOI: 10.1080/01944360608976767
53. Liu S., Zhu X. Accessibility Analyst: An Integrated GIS Tool for Accessibility Analysis in Urban Transportation Planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004; 31(1):105-124. DOI: 10.1068/b305
54. Koohsari M.J., Owen N., Cerin E., Giles-Corti B., Sugiyama T. Walkability and walking for transport: characterizing the built environment using space syntax. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2016; 13(1). DOI: 10.1186/s12966-016-0448-9
55. Litman T.A. Evaluating Accessibility for Transport Planning. *Victoria Transport Policy Institute*. 2025. URL: <https://www.vtpi.org/access.pdf>
56. Scott D.M., Horner M.W. The role of urban form in shaping access to opportunities: An exploratory spatial data analysis. *Journal of Transport and Land Use*. 2008; 1(2):89-119.

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

BIONOTES: Ekaterina O. Saveleva — PhD, senior lecturer at the Department of Architecture and Urban Studies; Perm National Research Polytechnic University; 29 Komsomolskiy pr., Perm, 614990, Russian Federation; e.saveleva@pstu.ru.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.051

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Система классификации и оценки территориальных рисков при строительстве гражданских объектов в Арктике

Валентин Валентинович Волгин, Роман Олегович Самсонов,
Максим Олегович Кузьмич

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность освоения Арктической зоны Российской Федерации обуславливается Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645 (в ред. от 27.02.23) «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». Освоение Арктической зоны сопровождается особыми рисками, связанными с экстремальными природно-климатическими условиями и деградацией многолетней мерзлоты. По разным оценкам, температура воздуха в Арктике растет в 3 раза быстрее среднемировой, что приводит к просадке мерзлоты и создает множественные серьезные как экологические, так и социальные угрозы. Для строительства гражданских объектов в таких суровых условиях необходима система управления рисками на предынвестиционной стадии, которая включает в себя классификацию территориальных и организационно-технологических рисков и оценку интегрального индекса пригодности участка.

Материалы и методы. Приводятся основные результаты научно-исследовательской работы по анализу и характеристике территориальных и организационно-технологических рисков в Арктике. Предложен подход многофакторной классификации рисков территории, используя геоинформационные данные и экспертные весовые коэффициенты. Также предложена шкала интегрального индекса пригодности территории.

Результаты. Сформирована классификация рисков для строительства гражданских объектов в арктическом секторе Российской Федерации. Предложена формула интегрального индекса пригодности территории, учитывающая весовой вклад каждой категории. На примере гипотетического участка в Ямало-Ненецком автономном округе показано применение методики: рассчитанный индекс пригодности соответствует классу «значительно опасный» и требует мероприятия по адаптации.

Выводы. Разработанная система позволяет на предынвестиционном этапе планировать качественное ранжирование потенциальной площадки строительства по уровню риска и обосновать принятие решений. Ее применение способствует повышению безопасности и устойчивости инфраструктуры в Арктике за счет выбора оптимальных территорий и/или разработки защитных мер на предынвестиционном этапе строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, арктический сектор, строительство в условиях вечной мерзлоты, классификация рисков, интегральный индекс пригодности, строительство гражданских зданий, строительство в Арктике

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волгин В.В., Самсонов Р.О., Кузьмич М.О. Система классификации и оценки территориальных рисков при строительстве гражданских объектов в Арктике // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Автор, ответственный за переписку: Максим Олегович Кузьмич, maksads@yandex.ru.

System for classifying and assessing territorial risks in the construction of civil facilities in the Arctic

Valentin V. Volgin, Roman O. Samsonov, Maxim O. Kuzmich

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

ABSTRACT

Introduction. The relevance of developing the Arctic zone of the Russian Federation is determined by Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of October 26, 2020 (as amended on February 27, 2023) "The Strategy for the Develop-

ment of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period until 2035". The development of the Arctic zone is accompanied by specific risks associated with extreme natural and climatic conditions and the degradation of permafrost. According to various estimates, the air temperature in the Arctic is rising three times faster than the global average, which leads to permafrost subsidence and creates multiple serious environmental and social threats. The construction of civil facilities in such harsh conditions requires a risk management system at the pre-investment stage, which includes the classification of territorial and organizational and technological risks and the assessment of an integral site suitability index.

Materials and methods. This paper presents the main results of research work on the analysis and characterization of territorial and organizational-technological risks in the Arctic. An approach to the multifactorial classification of territorial risks using geoinformation data and expert weighting coefficients is proposed. A scale for the integral suitability index of a territory is also proposed.

Results. A classification of risks for the construction of civil facilities in the Arctic sector of the Russian Federation has been developed. A formula for an integral index of territorial suitability is proposed, taking into account the weight contribution of each category. The application of the methodology is demonstrated using the example of a hypothetical site in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: the calculated suitability index corresponds to the "significantly hazardous" class and requires adaptation measures.

Conclusions. The developed system allows for the pre-investment stage to plan a qualitative ranking of potential construction sites by risk level and justify decision-making. Its application contributes to improving the safety and sustainability of infrastructure in the Arctic by selecting optimal territories and/or developing protective measures at the pre-investment stage of construction.

KEYWORDS: Arctic, Arctic sector, construction in permafrost conditions, risk classification, integral suitability index, civil building construction, construction in the Arctic

FOR CITATION: Volgin V.V., Samsonov R.O., Kuzmich M.O. System for classifying and assessing territorial risks in the construction of civil facilities in the Arctic. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):6. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Corresponding author: Maxim O. Kuzmich, maksads@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктической зоны Российской Федерации тесно связано с уникальными вызовами и рисками, оказывающими большое влияние на строительство гражданских объектов. Ключевые факторы риска включают в себя экстремальные климатические условия, деградацию многолетней мерзлоты, отсутствие инфраструктуры и другие особенности региона. По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН, темпы, с которыми на Земле становится жарче, возрастают. Так, средняя температура на планете вырастет на 1,5 °C уже к 2030 г., на 10 лет раньше, чем ожидалось прежде. При этом сильнее всего повышение температуры на планете ощущается на ее полюсах и выражается в быстром таянии льдов и вечной мерзлоты¹ [1]. Согласно международной программе арктического мониторинга и оценки (Arctic Monitoring and Assessment Programme — AMAP) и информации Арктического совета, несущая способность грунтов в зонах вечной мерзлоты снизится на 25–50 % в период с 2015 по 2025 г., на месторождениях Ямала — на 50–70 % [2]. Эти изменения создают угрозу устойчивости зданий и инфраструктуры. По данным статистики, более 50 % существующей инфраструктуры в вечной мерзлоте расположено в зонах с высоким риском протаивания грунтов. Стоит также отметить, что в настоящее время до 30 % зданий в от-

дельных городах имеют деформации и повреждения конструкций из-за деградации основания [3].

Строительство гражданских объектов в Арктике сталкивается не только с техническими трудностями, но и с высокими территориальными рисками. Под территориальными рисками понимаются угрозы, которые связаны со свойствами конкретной местности, которые могут оказывать негативное влияние на сроки и стоимость строительства. В условиях Арктики к таким рискам можно отнести:

- инженерно-геологические (нестабильные грунты, геокриологические процессы, глубина протаивания мерзлоты, подземные воды);
- криогенные (деградация мерзлоты, водозастой, температурная неоднородность);
- климатические (экстремальные температуры, снежные заносы, короткий строительный сезон, обледенение);
- логистические (отсутствие круглогодичного доступа, зимник и ледовые переправы, высокая стоимость доставки, удаленность от снабжения);
- инфраструктурные (отсутствие сетей, проблемы с подключением, необходимость подъездных путей);
- экологические (особо охраняемые природные территории (ООПТ) и миграционные пути, чувствительные экосистемы, водоохранные и санитарные зоны).

В современных реалиях возрастает потребность в изучении влияния деградации мерзлоты на инфраструктуру и разработке подхода к оценке рисков. Зарубежный опыт показывает, что исследователи применяют геоинформационные модели для графического представления опасных зон, примером может

¹ Как строить на века на тающей мерзлоте обсудили на II Форуме «Арктика – Регионы» // Восточный центр государственного планирования. 2024. URL: <https://vostokgosplan.ru/en/kak-stroit-na-veka-na-tajushhej-merzlote-obsudili-na-ii-forume-arktika-regiony/>

служить проект The Arctic Risk Map от норвежской компании DNV GL², основанный на базе ArcGIS for Server. Этот проект интегрирует информацию о температуре, штормовой активности, ледовой обстановке, наличии спасательных служб и т.п. В отечественных научных работах анализируется устойчивость конструкций и сооружений в условиях изменчивого климата (потепление и т.д.) [4, 5], предлагаются методики инженерной защиты оснований [6–8]. Однако нет единой системы классификации территориальных рисков для арктического строительства объектов гражданского назначения. Настоящее научное исследование предлагает восполнить этот пробел, предлагая структурированный подход к идентификации и оценке рисков, ориентированных на арктические территории. Новизна представленной работы заключается в адаптации имеющихся методов риск-менеджмента к условиям Крайнего Севера с учетом современных технологий и тенденций изменения окружающих факторов среды.

Цель исследования — разработка и описание системы классификации территориальных рисков и метода оценки интегрального показателя пригодности участка для гражданского строительства в Арктической зоне Российской Федерации.

В российской академической литературе существуют эмпирические свидетельства системного влияния криогенных процессов на инфраструктуру арктических городов (деформация фундаментов, термокарст, просадки, нарушение дренажа) и имеется необходимость региональной корректировки инженерных решений и мониторинга мерзлоты [9]. Итоговые работы по адаптации инфраструктуры Арктики делают акцент на меры охлаждения оснований, развитие сетей и улучшение технологий в градостроительстве и эксплуатации [10]. Публикации по проектированию и устройству оснований в условиях многолетнемерзлых грунтов (ММГ) описывают технологические решения (свайные поля, теплоизоляция, конструктивные схемы для сейсмо- и морозостойкости) и граничные условия их применимости [11]. Параллельно с этим развиваются подходы к оценке геодинамических и природно-техногенных рисков на проектах, ориентированных на Крайний Север, — от вероятностных до нечетких классификаторов и экспертных весов [12].

Инженерные обзоры и тематические статьи предлагают обширный спектр мер адаптации: предотвращение притока тепла в грунт, усиление отвода тепла (пассивные/активные системы термостабилизации), усиление основания и насыпей, а также корректировку конструктивных схем и режимов производства [13, 14].

² Картография Арктики: природные условия, освоение и риски // Esri CIS. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2017/05/10/arctic-development-mapping/>

Рассмотрим российскую практику: *газотранспортный коридор «Бованенково – Ухта» (ЯНАО) как северная «голова» системы «Ямал – Европа»*. Для выдачи газа с полуострова Ямал в Единую глубоководную систему Европейской части России (ЕГТС) построены две нитки «Бованенково – Ухта», включая сложные прибрежно-морские и заболоченные участки. Применены решения по защите изоляции в мерзлых и скальных грунтах (подушки, амортизирующие слои), противоэрозийные мероприятия (георешетки, берегоукрепление), удержание грунта на откосах, утяжеления на переходах водотоков. Цель — минимизация теплопритока к трубе и деформаций основания на фоне термокарста и сезонного оттаивания³.

«Ухта – Торжок» и экспортный маршрут «Ямал – Европа». Российская часть «Ямал – Европа» начинается в Торжке; газ из ЯНАО поступает по коридору «Бованенково – Ухта – Торжок». Пермафрост-критичные решения сосредоточены на северном плече («Бованенково – Ухта»), тогда как «Ухта – Торжок» в основном вне криолитозоны и обеспечивает пропускную способность и давление⁴.

«Сила Сибири». Трасса пересекает районы с ледонасыщенной мерзлотой и экстремальными температурами до –60 °С. Используются стали и сварочные технологии для низкотемпературной работы, подход strain-based design на потенциально деформируемых участках, усиленный геоэкологический мониторинг, сезонное планирование работ, локальные меры дренажа и снегозадержания [15].

Нефтепроводная система Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО). На пермафрост-участках применяются сезонно-действующие термостабилизаторы (двухфазные трубы/ТРСТ) для поддержания отрицательных температур основания, теплоизоляция, дренаж и инженерная защита откосов/насыпей; проводится регулярный мониторинг эффективности устройств⁵.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научная работа носит комплексный подход и опирается на данные методологии структурированного анализа рисков. Для составления системы классификации рисков были собраны сведения о факторах, влияющих на строительные проекты в Арктике.

³ Бованенковское НГКМ и система магистральных газопроводов Бованенково – Ухта // Газпром. URL: <https://proektirovanie.gazprom.ru/press/ehntsiklopediya-proektirovshchika/krupnejshie-proekty/bovanenkovskoe-ngkm-i-sistema/>

⁴ Ukhta – Torzhok (Yamal) 2 Gas Pipeline // Global energy monitor WIKI. URL: https://www.gem.wiki/Ukhta-Torzhok_%28Yamal%29_2_Gas_Pipeline

⁵ ООО «Транснефть – Восток» обследовало системы термостабилизации на объектах в зоне вечной мерзлоты // Ясис. URL: <https://ysia.ru/ooo-transneft-vostok-obsledovalo-sistemy-termostabilizatsii-na-obektah-v-zone-vechnoj-merzloty/>

За основу формирования перечня рисков приняты категории, рекомендованные экспертами, ориентированные на арктические проекты: природно-климатические, инженерно-геологические, инфраструктурно-логистические и экологические.

Рассмотрим каждую из описанных выше категорий рисков для строительства объектов гражданского назначения в Арктике.

Природно-климатические риски. К ним относятся экстремальные температуры воздуха, сильные ветры, обильные снегопады и метели, дрейфующий лед и образование наледи. Они влияют на увеличение сроков строительства, повышенный износ техники и конструкций, необходимость в уникальных технологиях. Также из-за перечисленных факторов возникают трудности с рабочей деятельностью инженеров, строительных бригад и т.д.

Инженерно-геологические риски. В данную группу входят риски, связанные с состоянием грунтов основания, например наличие многолетней мерзлоты, глубина сезонного протаивания, ледонасыщенность грунта, риск термокарста, просадок и наледей. Эти риски позиционируются как ключевые, так как устойчивость и сбалансированность основания — это сохранность всего сооружения.

Инфраструктурно-логистические риски. Транспортные системы в основном удалены от развитых арктических территорий, также имеются проблемы с инженерными коммуникациями. Отсутствие круглогодичных дорог, портов, ограниченная доступность — все это создает риски удорожания завоза материалов, задержки доставки техники и снабжения. Отмечаются необходимость строительства автономных источников энергии, ограниченные мощности местных сетей, отсутствие квалифицированных бригад на месте (для устранения экстренных ситуаций, поломок и т.д.).

Экологические риски. Сюда относятся ООПТ и миграционные пути животных, чувствительные экосистемы, а также водоохранные и санитарные зоны. Эти факторы накладывают ограничения на размещение площадки и график работ. Какие-то территории не подходят для строительства, где-то нужны увеличенные буферы. Возникают дополнительные требования к шуму, защите воды и почв.

Каждый из перечисленных блоков расписан на более детальные показатели (факторы риска). Для каждого фактора определены качественные и количественные градации риска. Например, по расстоянию до инфраструктуры: менее 50 км — низкий риск (близкое расположение к действующей инфраструктуре), 50–200 км — средний, более 200 км — высокий (труднодоступная местность).

Метод оценки и весовые коэффициенты. Для количественной оценки территориального риска используется метод балльной оценки с последующим суммированием с весовыми коэффициентами. Каждому фактору риска X_i присваивается значение

индекса r_i по шкале от 0 до 1, где 0 — отсутствие угрозы, а 1 — максимальная неблагоприятная ситуация. Баллы могут устанавливаться и коррелироваться на основе измеренных данных или экспертной оценки. Весовые коэффициенты блоков могут быть приняты равными, если считать все группы равнозначно важными, либо дифференцированными на основе экспертного ранжирования. В научном исследовании в базовом варианте приняты равные веса блоков ($a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0,25$). После присвоения баллов всем факторам и вычисления средних значений по блокам рассчитывается интегральный индекс пригодности территории $I_{\text{пр}}$ — обобщенный критерий, отражающий степень приемлемости участка для строительства. Индекс формируется как взвешенная сумма (или среднее) баллов по основным блокам рисков с учетом их весов:

$$I_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^m a_j R_j,$$

где $m = 4$ — число блоков; R_j — сводный риск по j -му блоку (0 — отсутствует, 1 — максимально критический). В простейшем случае (когда используются равные a_j) $I_{\text{пр}}$ есть среднее арифметическое четырех сводных оценок. В данной работе под индексом пригодности понимается доля рискованной составляющей: 0 означает полностью пригодный (безрисковый участок), 1 — полностью непригодный, без чрезвычайных мер. Таким образом, чем выше индекс пригодности, тем серьезнее суммарный территориальный риск и тем менее привлекательна площадка для строительства.

Для интерпретации интегрального индекса разработана шкала категоризации. Опираясь на подход, описанный в научных исследованиях [16], предложенных для нефтегазовых объектов в Арктике, установим семь градаций риска по величине $r = I_{\text{пр}}$:

- безопасная территория: $r < 0,2$. Практически не несет угроз для строительства, стандартные условия;
- слабо опасная: $0,2 < r < 0,3$. Небольшие риски, легко контролируемые штатными решениями;
- умеренно опасная: $0,3 < r < 0,45$. Средний уровень рисков, требуются специальные меры в проекте;
- опасная: $0,45 < r < 0,6$. Высокий риск, значительное влияние на проект, необходимость серьезных инженерных решений;
- значительно опасная: $0,6 < r < 0,8$. Очень высокий риск, без адаптационных мероприятий реализация проекта крайне усложняется;
- чрезвычайно опасная: $0,8 < r < 0,9$. Чрезвычайно высокий риск, строительство на таком участке почти всегда экономически нецелесообразно или технически сложно;
- катастрофически опасная: $r > 0,9$. Риск недопустимо высок, территория практически непригодна для освоения в текущих условиях.

Эти категории приводят оценку к понятному уровню, чтобы принятые решения были обоснова-

ны, корректны и удобны. Стоит отметить, что пороговые значения выбраны исходя из анализа научной литературы, их можно варьировать под конкретные требования проекта. Предложенная шкала учитывает российский опыт риск-оценки для арктических территорий [17].

Данные и инструменты. С целью практической реализации изложенного подхода предполагается использование ГИС-платформы для сбора и анализа пространственных данных и рисков. В рамках исследования сформирован набор условных сведений для демонстрационного примера: климатические параметры (температура воздуха и т.д.); геокриологические характеристики — обобщенные результаты мониторинга мерзлоты, проводимого Научным центром изучения Арктики [18]; инфраструктурные сведения — спутниковые снимки, открытые карты дорог и поселков. Интеграция комплекса данных в ГИС позволяет наглядно идентифицировать ключевые факторы риска на карте и сопоставить информацию по разным участкам. К примеру, при помощи Arctic Risk Map или аналогичного приложения можно визуально оценить, находится ли рассматриваемый участок в зоне частых штормов, в зоне миграции животных или рядом с особо охраняемыми территориями. В настоящей работе для упрощения все оценки проведены аналитически, однако в перспективе предлагается разработать цифровой инструмент — ГИС ориентированную систему поддержки принятия решений, куда будут интегрированы и прописаны модели расчета индекса пригодности. Этот инструмент сможет автоматически присваивать баллы по факторам на основе загруженных слоев (карта мерзлоты, климатические карты, транспортная схема), а затем выдавать интегральную оценку и рекомендацию по категории риска.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика системы. В результате проведенного исследования сформирована целостная система классификации и оценки территориальных рисков, предназначенная для предварительного анализа территорий для строительства в Арктике. Система включает: описательную структуру рисков; метод балльной оценки факторов и расчета интегрального индекса пригодности; шкалирование индекса по категориям риска с интерпретацией; рекомендации — типовые предложения по мерам для каждой категории риска.

Описательная структура рисков. Составлена древовидная схема рисков проекта строительства в Арктике (рисунок). Вершина — Территориальный риск проекта, далее идет разветвление на 6 категорий первого уровня: инженерно-геологические; криогенные; климатические; логистические; инфраструктурные; экологические. Каждая категория, в свою очередь, расписана на 4–5 конкретных показателей. Такое детальное описание дает возможность сконцентрировать сбор данных по каждому пункту.

Пример расчета для гипотетического участка в ЯНАО

Для демонстрации работы системы рассмотрим условный пример. Предположим, что планируется строительство жилого микрорайона в Ямало-Ненецком автономном округе в 30 км к северо-востоку от г. Новый Уренгой. Местность — плато с высотами, примерно 60 м над уровнем моря, покрытое лесотундрой. Исходные данные (гипотетические, но близкие к средним значениям для этой локации): среднегодовая температура –8 °С, расчетная минимальная –50 °С; продолжительность зимы ~ 8 месяцев; роза ветров — частые сильные ветры зи-



Схема территориальных рисков проектов строительства в Арктике

мой; снег выпадает до 2 м за зиму. Грунты — вечная мерзлота с температурой на глубине фундамента ~ -3 °С, мощность сезонно-талого слоя 1,5–2 м; рельеф относительно ровный, но близко протекает река (потенциальное подтопление при паводке исключено, так как участок на возвышенности). Сейсмичность района низкая (не более 6 баллов). Инфраструктура: ближайшая асфальтированная дорога — в 25 км; электрические сети отсутствуют, но в будущем планируется строительство ЛЭП; до железной дороги ~ 40 км; доставка грузов возможна зимой напрямую от Уренгоя. Подводя итог: у участка высокий инженерно-геокриологический риск (теплая мерзлота со льдом), умеренно высокий климатический риск (экстремальный холод и ветры), инфраструктурный риск средний (относительная близость города, но отсутствие инженерных коммуникаций на локации), социально-экономический риск умеренный (необитаемая зона). Проведем количественную оценку по методике:

- инженерно-геокриологический блок: $R_{\text{инж-гео}} \approx 0,65$;
- климатический блок $R_{\text{клим}} \approx 0,7$;
- инфраструктурный блок $R_{\text{инф}} \approx 0,55$;
- социально-экономический блок $R_{\text{соц-экон}} \approx 0,5$.

Далее просуммируем получившиеся веса: $I_{\text{пр}} = 0,25(0,65 + 0,7 + 0,55 + 0,5) \approx 0,6$. Это значение попадает в диапазон 0,6–0,8 — «значительно опасная» категория риска. Такой участок еще может быть пригоден для поставленной задачи, но требует серьезных мер: в данном случае необходимо предусмотреть дорогие фундаменты на сваях с термосифонами для охлаждения грунта (чтобы предотвратить его оттаивание) и т.д. Этот пример иллюстрирует практическую ценность методики: еще на этапе планирования инвестор и проектировщики могут составить «портрет» территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство в Арктике сопряжено с уникальным сочетанием природных и техногенных рисков, требующих особого внимания на этапах планирования, проектирования и эксплуатации объектов. Разработка системы классификации и оценки территориальных рисков позволяет структурированно подходить к этой задаче. Классификация рисков по ка-

тегориям (климатическим, экологическим, социально-экономическим и др.) дает возможность охватить все аспекты угроз, связанных с территорией строительства. Количественная оценка и моделирование рисков, в свою очередь, дают инструменты для прогноза и сравнения вариантов — это основа для принятия обоснованных управленческих решений.

Применение описанной системы на практике означает, что до начала строительства можно идентифицировать наиболее опасные факторы для конкретной площадки (будь то вероятное протаивание мерзлоты, зона возможного подтопления или отсутствие резервных путей снабжения) и оценить, насколько критичным будет их влияние. Это позволяет заложить в проект необходимые меры защиты: усиленные конструкции, дополнительные ресурсы, планы по чрезвычайным ситуациям. В ходе реализации проекта непрерывный мониторинг и пересмотр оценок риска обеспечивают актуальность принятых мер на всем протяжении жизненного цикла объекта.

Важно подчеркнуть, что в условиях ускоренного изменения климата и активизации хозяйственного освоения Арктики система управления рисками не остается статичной. Она эволюционирует, опираясь на данные исследований и технологические инновации. Например, выявление новых опасных геологических процессов, связанных с деградацией мерзлоты, ведет к пересмотру классификации рисков и методов их оценки; появление более точных климатических моделей улучшает прогнозирование экстремальных нагрузок и т.д. Таким образом, система классификации и оценки рисков должна быть гибкой и адаптивной, регулярно обновляемой совместными усилиями ученых, инженеров и управленцев.

Внедрение системного подхода к оценке территориальных рисков при строительстве в Арктике позволит значительно повысить безопасность и эффективность проектов. Классификация рисков обеспечивает всестороннее видение проблем, оценка — количественное понимание вероятности и последствий, а последующее управление рисками — снижение этих вероятностей и последствий до приемлемого уровня. Все это служит залогом устойчивого развития арктических регионов, сохранения жизни и здоровья людей, а также защиты уникальной природы Севера при освоении его богатств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Халбашкеев А. Таяние вечной мерзлоты: риски и решения для нефтегазового сектора // Нефтегазовая промышленность. 2022. № 2. URL: <https://dprom.online/mtindustry/tayaneeeye-vyechoyni-myerzloti-reeskee-ee-ryeshyeneeya/>

2. Янушкевич К. Эксперты ООН оценили темпы глобального потепления: +1,5 °С к 2030 году // РБК. 2022.

URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/611250239-a794709fafa6108>

3. Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Issue 1. Pp. 24–38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8

4. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601. EDN HEVLIU.

5. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 184. EDN ZMNXP.

6. Плотников А.А., Гурьянов Г.Р. Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 5. С. 535–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544. EDN XLDIRY.

7. Огороков Н.С., Коркишко А.Н., Коржикова А.П. Экспериментальное исследование принудительно вентилируемой сваи // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 5. С. 665–677. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.665-677. EDN TVUCZV.

8. Климов А.С., Емельянов Р.Т., Чумакова Е.В., Климова О.Л. Метод охлаждения околосвайных многолетнемерзлых грунтов в зоне экстремального северного климата // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146. EDN FJSKTM.

9. Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А. и др. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 2. С. 25–36. EDN MXVVKH.

10. Doré G., Niu F., Brooks H. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. 2016. Vol. 27. Issue 4. Pp. 352–364. DOI: 10.1002/ppp.1919

11. Рзаев Ч.Т. Выбор типа конструкций фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Наука се-

годня: глобальные вызовы и механизмы развития : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 25–27. EDN YOGSIT.

12. Yu W., Zhang T., Lu Y., Han F., Zhou Y., Hu D. Engineering risk analysis in cold regions: State of the art and perspectives // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 171. P. 102963. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102963

13. Wu Q., Ma W., Lai Y., Cheng G. Permafrost Degradation Threatening the Qinghai–Xizang Railway // Engineering. 2025. Vol. 49. Pp. 177–189. DOI: 10.1016/j.eng.2024.01.023

14. Du S., Ye Z. Analysis and Applications of the Two Phases Closed Thermosyphon Technology in the Highways in Permafrost Regions : a Review // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 4185. DOI: 10.3390/app14104185

15. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the Permafrost Conditions along Pipeline Routes in Central Yakutia, Russia // Land. 2022. Vol. 11. Issue 12. P. 2331. DOI: 10.3390/land11122-331

16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. Issue 2. P. 025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6

17. Степанов Р.О., Ахметшин Т.Р. Оценки геодинамических рисков для нефтегазовых комплексов Арктической зоны // Российская Арктика. 2021. № 1 (12). С. 50–61. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-50-61. EDN FVZZGL.

18. Шейн А.Н., Краев Г.Н., Камнев Я.К. Геофизические исследования при организации и обслуживании региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 2. № 1. С. 321–327. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-1-321-327. EDN VXXFRR.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валентин Валентинович Волгин** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства и управления недвижимостью, проректор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; VolginVV@gic.mgsu.ru;

Роман Олегович Самсонов — доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории «Организационно-технологические системы использования искусственного интеллекта в строительстве»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SamsonovRO@mgsu.ru;

Максим Олегович Кузьмич — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; maksads@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The development of the Arctic zone of the Russian Federation is closely linked to unique challenges and risks that have a significant impact on the construction of civil facilities. Key risk factors include extreme climatic conditions, permafrost degradation, lack of infrastructure and other characteristics of the region. According to estimates by the UN Intergovernmental Panel on Climate Change, the rate at which the Earth is getting warmer is increasing. The average global temperature is expected to rise by 1.5 °C by 2030, 10 years earlier than previously expected. The most significant increase in global temperatures is being felt at the poles, where it is causing rapid melting of ice and permafrost¹ [1]. According to the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) and information from the Arctic Council, the bearing capacity of soils in permafrost areas will decrease by 25–50 % between 2015 and 2025, and by 50–70 % in the Yamal deposits [2]. These changes pose a threat to the stability of buildings and infrastructure. According to statistics, more than 50 % of existing infrastructure in permafrost is located in areas with a high risk of soil thawing. It is also worth noting that currently up to 30 % of buildings in some cities have structural deformations and damage due to foundation degradation [3].

The construction of civil engineering structures in the Arctic faces not only technical difficulties, but also high territorial risks. Territorial risks are understood to be threats associated with the properties of a specific area that may have a negative impact on construction timelines and costs. In the Arctic, these risks include:

- engineering-geological (unstable soils, geocryological processes, depth of permafrost thawing, groundwater);
- cryogenic (permafrost degradation, waterlogging, temperature heterogeneity);
- climatic (extreme temperatures, snow drifts, short construction season, icing);
- logistical (lack of year-round access, winter roads and ice crossings, high delivery costs, remoteness from supplies);
- infrastructural (lack of networks, connection problems, need for access roads);
- environmental (specially protected natural areas (SPNA) and migration routes, sensitive ecosystems, water protection and sanitary zones).

In today's reality, there is a growing need to study the impact of permafrost degradation on infrastructure and to develop an approach to risk assessment. Foreign experience shows that researchers use geoinformation models to graphically represent hazardous ar-

eas. An example is The Arctic Risk Map project from the Norwegian company DNV GL², based on ArcGIS for Server. This project integrates information on temperature, storm activity, ice conditions, the availability of rescue services, etc. Domestic scientific works analyze the stability of structures and facilities in conditions of a changing climate (warming, etc.) [4, 5] and propose methods for the engineering protection of foundations [6–8]. However, there is no unified system for classifying territorial risks for the construction of civil facilities in the Arctic. This scientific study aims to fill this gap by proposing a structured approach to the identification and assessment of risks specific to Arctic territories. The novelty of this work lies in the adaptation of existing risk management methods to the conditions of the Far North, taking into account modern technologies and trends in environmental factors.

The aim of the study is to develop and describe a system for classifying territorial risks and a method for assessing the overall suitability of a site for civil construction in the Arctic zone of the Russian Federation.

Russian academic literature provides empirical evidence of the systemic impact of cryogenic processes on the infrastructure of Arctic cities (foundation deformation, thermokarst, subsidence, drainage failure) and the need for regional adjustments to engineering solutions and permafrost monitoring [9]. The final works on the adaptation of Arctic infrastructure focus on foundation cooling measures, network development and improvement of technologies in urban planning and operation [10]. Publications on the design and construction of foundations in permafrost conditions describe technological solutions (pile fields, thermal insulation, structural schemes for seismic and frost resistance) and the boundary conditions for their applicability [11]. In parallel with this, approaches to assessing geodynamic and natural-technogenic risks in projects focused on the Far North are being developed, ranging from probabilistic to fuzzy classifiers and expert weights [12].

Engineering reviews and thematic articles offer a wide range of adaptation measures: preventing heat flow into the ground, enhancing heat removal (passive/active thermal stabilization systems), strengthening foundations and embankments, and adjusting design schemes and production modes [13, 14].

Let us consider Russian practice: the Bovanenkovo – Ukhta gas transport corridor (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) as the northern “head” of the Yamal – Europe system. To deliver gas from the Yamal Peninsula to the EGTU, two Bovanenkovo – Ukhta lines were built, including complex coastal, marine, and marshy areas. Solutions were implemented to protect insulation in frozen and rocky soils (cushions, shock-absorbing layers), anti-erosion measures (geogrids, shore reinforcement), soil retention on slopes, and ballast on wa-

¹ How to build for centuries on melting permafrost was discussed at the II Forum “Arctic – Regions”, Eastern Centre for State Planning. 2024. URL: <https://vostokgosplan.ru/en/kak-stroit-na-veka-na-tajushhej-merzlotе-obsudili-na-ii-forume-arktika-regiony/>

² Esri CIS. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2017/05/10/arctic-development-mapping/>

tercourse crossings. The goal is to minimize heat flow to the pipe and foundation deformation due to thermokarst and seasonal thawing³.

Ukhta – Torzhok and the Yamal – Europe export route. The Russian section of Yamal – Europe begins in Torzhok; gas from the Yamal-Nenets Autonomous Okrug is transported via the Bovanenkovo – Ukhta – Torzhok corridor. Permafrost-critical solutions are concentrated on the northern branch (Bovanenkovo – Ukhta), while Ukhta – Torzhok is mainly outside the cryosphere and provides throughput and pressure⁴.

Power of Siberia. The route crosses areas with ice-saturated permafrost and extreme temperatures down to –60 °C. Steels and welding technologies for low-temperature operation are used, along with a strain-based design approach in potentially deformable areas, enhanced geocryological monitoring, seasonal work planning, and local drainage and snow retention measures [15].

The ESPO oil pipeline system (Transneft). Seasonal thermal stabilizers (two-phase tubes/TPCT) are used in permafrost areas to maintain negative base temperatures, thermal insulation, drainage and engineering protection of slopes/embankments; the effectiveness of the devices is monitored regularly⁵.

MATERIALS AND METHODS

The scientific work takes a comprehensive approach and is based on structured risk analysis methodology. To develop a risk classification system, information was collected on factors affecting construction projects in the Arctic. The list of risks is based on categories recommended by experts focused on Arctic projects: natural and climatic, engineering and geological, infrastructure and logistics, and environmental.

Let us consider each of the above categories of risks for the construction of civil facilities in the Arctic.

Natural and climatic risks. These include extreme air temperatures, strong winds, heavy snowfall and blizzards, drifting ice and ice formation. They contribute to longer construction times, increased wear and tear on equipment and structures, and the need for unique technologies. These factors also create difficulties for engineers, construction crews, etc. in their work.

Engineering and geological risks. This group includes risks associated with the condition of the foundation soil, such as the presence of permafrost, the depth

of seasonal thawing, ice saturation of the soil, the risk of thermokarst, subsidence and ice jams. These risks are considered key, as the stability and balance of the foundation is crucial to the integrity of the entire structure.

Infrastructure and logistics risks. Transport systems are mostly located far from developed Arctic territories, and there are also problems with engineering communications. The lack of year-round roads and ports, as well as limited accessibility, create risks of increased costs for the delivery of materials and delays in the delivery of equipment and supplies. There is a need to build autonomous energy sources, limited capacity of local networks, and a lack of qualified teams on site (to deal with emergencies, breakdowns, etc.).

Environmental risks. These include protected areas and animal migration routes, sensitive ecosystems, as well as water protection and sanitary zones. These factors impose restrictions on site location and work schedules. Some areas are unsuitable for construction, while others require larger buffers. Additional requirements arise for noise, water and soil protection.

Each of the above blocks is broken down into more detailed indicators (risk factors). Qualitative and quantitative risk gradations are defined for each factor. For example, based on distance to infrastructure: less than 50 km — low risk (close proximity to existing infrastructure), 50–200 km — medium risk, more than 200 km — high risk (difficult-to-access terrain).

Assessment method and weighting coefficients. To quantitatively assess territorial risk, a scoring method is used, followed by summation with weighting coefficients. Each risk factor X_i is assigned an index value r_i on a scale from 0 to 1, where 0 indicates no threat and 1 indicates the most unfavorable situation. Points can be set and correlated based on measured data or expert assessment. The weighting coefficients of the blocks can be taken as equal if all groups are considered equally important, or differentiated based on expert ranking. In the scientific study, equal weights of blocks ($a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0.25$) are taken in the basic version. After assigning scores to all factors and calculating the average values for each block, the integral index of suitability of the territory I_{val} is calculated — a generalized criterion reflecting the degree of acceptability of the site for construction. The index is formed as a weighted sum (or average) of scores for the main risk blocks, taking into account their weights:

$$I_{val} = \sum_{j=1}^m a_j R_j,$$

where $m = 4$ is the number of blocks; R_j is the combined risk for the j -th block (0 — absent, 1 — most critical). In the simplest case (when equal a_j are used), I_{val} is the arithmetic mean of the four combined assessments. In this work, the suitability index is understood as the share of the risk component: 0 means completely suitable (risk-free area), 1 means completely unsuitable, without emergency measures. Thus, the higher the suit-

³ Bovanenkovskoye NGCM and the Bovanenkovo – Ukhta trunk gas pipeline system, Gazprom. URL: <https://proektirovanie.gazprom.ru/press/ehntsiklopediya-proektirovshchika/krupnejshie-proekty/bovanenkovskoe-ngkm-i-sistema/>

⁴ Ukhta – Torzhok (Yamal) 2 Gas Pipeline, Global energy monitor WIKI. URL: https://www.gem.wiki/Ukhta-Torzhok_%28Yamal%29_2_Gas_Pipeline

⁵ Transneft Vostok LLC inspected thermostabilizing systems at facilities in the permafrost zone, Yasia. URL: <https://ysia.ru/ooo-transneft-vostok-obsledovalo-sistemy-termostabilizatsii-na-obektah-v-zone-vechnoj-merzloty/>

ability index, the more serious the total territorial risk and the less attractive the site for construction.

A categorization scale has been developed to interpret the integral index. Based on the approach described in scientific studies [16] proposed for oil and gas facilities in the Arctic, we will establish seven risk gradations according to the value of $r = I_{val}$:

- safe territory: $r < 0.2$. Practically no threat to construction, standard conditions;
- slightly dangerous: $0.2 < r < 0.3$. Minor risks, easily controlled by standard solutions;
- moderately dangerous: $0.3 < r < 0.45$. Average level of risk, special measures required in the project;
- dangerous: $0.45 < r < 0.6$. High risk, significant impact on the project, serious engineering solutions required;
- significantly dangerous: $0.6 < r < 0.8$. Very high risk, without adaptation measures, project implementation becomes extremely complicated;
- extremely dangerous: $0.8 < r < 0.9$. Extremely high risk, construction on such a site is almost always economically unfeasible or technically difficult;
- catastrophically dangerous: $r > 0.9$. The risk is unacceptably high, the territory is practically unsuitable for development under current conditions.

These categories bring the assessment to an understandable level so that the decisions made are justified, correct and convenient. It is worth noting that the threshold values are selected based on an analysis of scientific literature and can be varied according to the specific requirements of the project. The proposed scale takes into account Russian experience in risk assessment for Arctic territories [17].

Data and tools. For the practical implementation of this approach, a GIS platform will be used to collect and analyze spatial data and risks. As part of the study, a set of conditional data was compiled for a demonstration example: climatic parameters (air temperature, etc.); geocryological characteristics — summarized results of permafrost monitoring conducted by the Arctic Research Centre [18]; infrastructure data — satellite images, open maps of roads and settlements. Integrating the data set into a GIS allows key risk factors to be clearly identified on a map and information on different areas to be compared. For example, using Arctic Risk Map or a similar application, it is possible to visually assess whether the area in question is located in a zone of frequent storms, in an animal migration zone or near specially protected areas. In this work, for simplicity, all assessments were carried out analytically, but in the future, it is proposed to develop a digital tool — a GIS-oriented decision support system, where models for calculating the suitability index will be integrated and prescribed. This tool will be able to automatically assign scores for factors based on uploaded layers (permafrost map, climate maps, transport scheme) and then provide an integrated assessment and recommendation for the risk category.

RESEARCH RESULTS

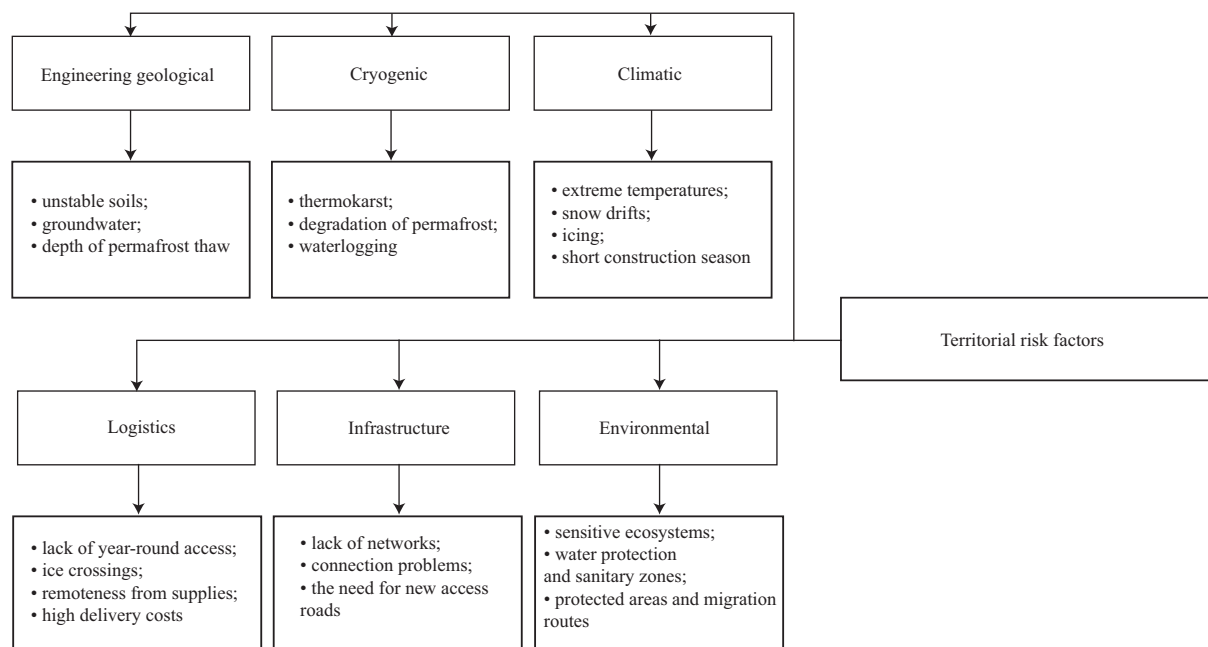
General characteristics of the system. As a result of the research, a comprehensive system for classifying and assessing territorial risks has been developed, designed for preliminary analysis of territories for construction in the Arctic. The system includes: a descriptive risk structure; a method for scoring factors and calculating an integral suitability index; scaling of the index by risk category with interpretation; recommendations — typical proposals for measures for each risk category.

Descriptive risk structure. A tree diagram of the risks of the construction project in the Arctic has been drawn up (see Fig.). At the top is the territorial risk of the project, followed by a branching into six first-level categories: engineering and geological; cryogenic; climatic; logistical; infrastructural; and environmental. Each category, in turn, is broken down into 4–5 specific indicators. Such a detailed description makes it possible to concentrate on collecting data for each item.

Calculation example for a hypothetical site in the Yamalo-Nenets Autonomous District

To demonstrate how the system works, let's consider a hypothetical example. Suppose that a residential neighbourhood is planned to be built in the Yamalo-Nenets Autonomous District, 30 km northeast of Novy Urengoy. The terrain is a plateau with elevations of approximately 60 m above sea level, covered with forest-tundra. Initial data (hypothetical, but close to the average values for this location): average annual temperature -8°C , estimated minimum -50°C ; winter duration ~ 8 months; wind rose — frequent strong winds in winter; snowfall up to 2 m per winter. Soils — permafrost with a temperature at the foundation depth of $\sim -3^{\circ}\text{C}$, seasonal thaw layer thickness 1.5–2 m; the relief is relatively flat, but a river flows nearby (potential flooding during high water is excluded, as the site is on high ground). The seismicity of the area is low (no more than 6 points). Infrastructure: the nearest asphalt road is 25 km away; there are no electrical networks, but the construction of a power line is planned for the future; the railway is ~ 40 km away; cargo delivery is possible in winter directly from Urengoy. To sum up: the site has a high engineering and geocryological risk (warm permafrost with ice), a moderately high climatic risk (extreme cold and winds), an average infrastructure risk (relative proximity to the city, but no engineering communications at the location), and a moderate socio-economic risk (uninhabited area). We will conduct a quantitative assessment using the following methodology:

- engineering and geocryological block: $R_{eng-geo} \approx 0.65$;
- climatic block $R_{clim} \approx 0.7$;
- infrastructure block $R_{inf} \approx 0.55$;
- socio-economic block $R_{soc-econ} \approx 0.5$.



Territorial risk map for construction projects in the Arctic

Next, we sum up the resulting weights: $I_{val} = 0.25(0.65 + 0.7 + 0.55 + 0.5) \approx 0.6$. This value falls within the range of 0.6–0.8 — the “significantly dangerous” risk category. Such a site may still be suitable for the task at hand, but requires serious measures: in this case, it is necessary to provide for expensive foundations on piles with thermosiphons for cooling the soil (to prevent it from thawing), etc. This example illustrates the practical value of the methodology: even at the planning stage, investors and designers can create a “portrait” of the territory.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Construction in the Arctic involves a unique combination of natural and man-made risks that require special attention during the planning, design and operation stages of facilities. The development of a system for classifying and assessing territorial risks allows for a structured approach to this task. Classifying risks by category (climatic, environmental, socio-economic, etc.) makes it possible to cover all aspects of the threats associated with the construction site. Quantitative risk assessment and modelling, in turn, provide tools for forecasting and comparing options, which is the basis for making informed management decisions.

Applying the described system in practice means that before construction begins, the most dangerous factors for a specific site can be identified (whether it is probable thawing of permafrost, a zone of possible flooding, or the absence of backup supply routes) and their critical impact can be assessed. This allows

the necessary protective measures to be incorporated into the project: reinforced structures, additional resources, emergency plans. During the implementation of the project, continuous monitoring and review of risk assessments ensure that the measures taken remain relevant throughout the entire life cycle of the facility.

It is important to emphasize that in the context of accelerated climate change and increased economic development in the Arctic, the risk management system is not static. It evolves based on research data and technological innovations. For example, the identification of new hazardous geological processes associated with permafrost degradation leads to a revision of risk classifications and assessment methods; the emergence of more accurate climate models improves the prediction of extreme loads, etc. Thus, the risk classification and assessment system must be flexible and adaptive, regularly updated through the joint efforts of scientists, engineers and managers.

The introduction of a systematic approach to assessing territorial risks in construction in the Arctic will significantly improve the safety and efficiency of projects. Risk classification provides a comprehensive view of the problems, assessment provides a quantitative understanding of the probabilities and consequences, and subsequent risk management reduces these probabilities and consequences to an acceptable level. All this serves as a guarantee of sustainable development in the Arctic regions, the preservation of human life and health, and the protection of the unique nature of the North while exploiting its riches.

REFERENCES

1. Khalbashkeev A. Permafrost thawing: risks and solutions for the oil and gas sector. *Oil and Gas Industry*. 2022; 2. URL: <https://dprom.online/mtindustry/ta-yaneeye-vyechnoyi-myerzloti-reeskee-ee-ryeshyeneeya/> (rus.).
2. Yanushkevich K. UN experts estimate global warming rate: +1.5 °C by 2030. *RBC*. 2022. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/611250239a794709fafa6108> (rus.).
3. Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022; 3(1):24-38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8
4. Melnikov V.P., Osipov V.I., Broushkov A.V., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A. et al. Adaptation of arctic and subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen soils. *Earth's Cryosphere*. 2021; 25(6):3-15. DOI: 10.15372/KZ20210601. EDN HEVLIU. (rus.).
5. Okhlopko T.V., Gurianov G.R., Plotnikov A.A. Construction and design of buildings and structures in permafrost. *Engineering journal of Don*. 2018; 4(51):184. EDN ZMNXP. (rus.).
6. Plotnikov A.A., Guryanov G.R. Modern methods of cooling permafrost ground beds of multi-storey residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):535-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544. EDN XLDIRY. (rus.).
7. Okorokov N.S., Korkishko A.N., Korzhikova A.P. An experimental study of a forced ventilation pile. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(5):665-677. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.665-677. EDN TVUCZV. (rus.).
8. Klimov A.S., Emelyanov R.T., Chumakova E.V., Klimova O.L. Cooling of near-pile permafrost soils in the Arctic region. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(4):138-146. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146. EDN FJSKTM. (rus.).
9. Grebenets V.I., Kizyakov A.I., Maslakov A.A., Sokratov S.A., Streletskaya I.D., Tolmanov V.A. et al. Impact of hazardous cryogenic processes on urban infrastructure in the Arctic. *Moscow University Bulletin*. Series 5, Geography. 2022; 2:25-36. EDN MXVVKH. (rus.).
10. Doré G., Niu F., Brooks H. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016; 27(4):352-364. DOI: 10.1002/ppp.1919
11. Rzaev Ch.T. Selection of foundation types for permafrost soils. *Science today: global challenges and development mechanisms : materials of the international scientific and practical conference*. 2017; 25-27. EDN YOGSIT. (rus.).
12. Yu W., Zhang T., Lu Y., Han F., Zhou Y., Hu D. Engineering risk analysis in cold regions: State of the art and perspectives. *Cold Regions Science and Technology*. 2020; 171:102963. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102963
13. Wu Q., Ma W., Lai Y., Cheng G. Permafrost Degradation Threatening the Qinghai–Xizang Railway. *Engineering*. 2025; 49:177-189. DOI: 10.1016/j.eng.2024.01.023
14. Du S., Ye Z. Analysis and Applications of the Two Phases Closed Thermosyphon Technology in the Highways in Permafrost Regions : a Review. *Applied Sciences*. 2024; 14(10):4185. DOI: 10.3390/app14104185
15. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the Permafrost Conditions along Pipeline Routes in Central Yakutia, Russia. *Land*. 2022; 11(12):2331. DOI: 10.3390/land11122331
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N., Porfiriiev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*. 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6
17. Stepanov R.O., Akhmetshin T.R. Geodynamic risk assessments for oil and gas industry of the Arctic zone. *Russian Arctic*. 2021; 1(12):50-61. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-50-61. EDN FVZZGL. (rus.).
18. Shein A.N., Kraev G.N., Kamnev Ya.K. Geophysical research for organization and service of the regional permafrost monitoring network in the Yamalo-Nenets autonomous district. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022; 2(1):321-327. DOI: 10.33764/2618-981X2022-2-1-321-327. EDN VXXFRR. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Valentin V. Volgin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization and Real Estate Management, Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; VolginVV@gic.mgsu.ru;

Roman O. Samsonov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Laboratory of “Organizational and Technological Systems for the Use of Artificial Intelligence in Construction”; **Moscow State**

University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SamsonovRO@mgsu.ru;

Maxim O. Kuzmich — postgraduate student, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);** 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; maksads@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059.25

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.7

Анализ подходов к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта

Юлия Юрьевна Ивакина¹, Иван Олегович Ратушный^{1,2}

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

² *АФА ГЕНПРОЕКТ; г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Здания медицинских учреждений подвержены моральному и физическому износу, вследствие которого перестают удовлетворять современным санитарно-гигиеническим нормам, требованиям безопасности и др. Проведение капитального ремонта является одним из ключевых решений данной проблемы. Это сложный процесс, требующий учета множества факторов, влияющих на эффективность выполнения поставленной задачи. Рассматриваются подходы к проектированию медицинских учреждений при капитальном ремонте.

Материалы и методы. Проанализированы нормативно-правовое регулирование в области капитального ремонта, используемое при проектировании, а также строящиеся и реализованные проекты по капитальному ремонту медицинских учреждений Москвы и Московской области.

Результаты. Выделены шесть ключевых подходов к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта: обеспечение механической, санитарно-гигиенической и противопожарной безопасности; создание комфортного пространства; достижение функциональности здания для эффективной организации труда; обеспечение доступности объекта для маломобильных групп населения; реализация мер по энергосбережению и рациональному расходованию энергетических ресурсов; соблюдение единых архитектурных, объемно-пространственных и интерьерных решений для медицинских учреждений, объединенных общностью типа либо организационной принадлежностью. Приведены конкретные примеры реализации каждого из перечисленных подходов в реальных проектах.

Выводы. Для достижения максимального эффекта при проектировании медицинских учреждений в ходе капитального ремонта рекомендуется руководствоваться указанными подходами, которые позволяют значительно увеличить качество отремонтированных медицинских учреждений, повысить комфортность и безопасность пребывания пациентов и персонала, а также будут способствовать экономии ресурсов и увеличению продолжительности жизненного цикла зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальный ремонт, медицинские учреждения, проектирование, доступность, маломобильные группы населения, энергоэффективность, безопасность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ивакина Ю.Ю., Ратушный И.О. Анализ подходов к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.7

Автор, ответственный за переписку: Иван Олегович Ратушный, ivan.ratushny25@gmail.com.

Analysis of approaches to the design of medical institutions during capital repair

Yulia Yu. Ivakina¹, Ivan O. Ratushny^{1,2}

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

² *AFA GENPROJECT; Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Buildings of medical institutions are subject to moral and physical deterioration, which makes them unsuitable for modern sanitary and hygienic standards, safety requirements, and more. Capital repair is one of the key solutions to this problem. However, this is a complex process that requires careful consideration of various factors that can affect the effectiveness of the repair. This article aims to explore the approaches to designing medical institutions during capital repair.

Materials and methods. The authors study the regulatory documents for major repairs used in design. They also consider completed and under-construction medical institutions in Moscow and the Moscow Region.

Results. According to the results of the study, the authors identify six key approaches to the design of medical institutions during major repairs: ensuring mechanical, sanitary, hygienic and fire safety; creating a comfortable space; achieving building functionality for effective work organisation; ensuring accessibility of the facility for people with limited mobility;

implementation of measures for energy efficiency and rational use of energy resources; compliance with uniform architectural, planning and interior solutions for medical institutions united by a common type or organisational affiliation. Specific examples of the implementation of each of the listed approaches in real projects are given.

Conclusions. To achieve maximum effect in the design of medical facilities during capital repairs, it is recommended to follow these approaches, which can significantly improve the quality of renovated medical institutions, increase the comfort and safety of patients and staff, and help to save resources and extend the life cycle of buildings.

KEYWORDS: major repairs, medical institution, design, accessibility, people with limited mobility, energy efficiency, safety

FOR CITATION: Ivakina Yu.Yu., Ratushny I.O. Analysis of approaches to the design of medical institutions during capital repair. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.7

Corresponding author: Ivan O. Ratushny, ivan.ratushny25@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования показывают, что уровень материально-технического обеспечения медицинских учреждений играет большую роль в предоставлении качественной и своевременной медицинской помощи, удовлетворяющей население страны [1–4]. При значительном уровне физического и/или морального износа здания медицинских учреждений перестает отвечать современным санитарно-гигиеническим нормам: становится невозможно использовать новое медицинское технологическое оборудование, ухудшаются параметры микроклимата помещений, снижается уровень комфорта и безопасности пациентов [5, 6].

Проведение капитального ремонта медицинских учреждений является важной составляющей поддержания качественного функционирования системы здравоохранения [7]. Это сложный процесс, требующий учета множества факторов, влияющих на эффективность выполнения поставленной задачи [8]. В предыдущих исследованиях авторов рассматривались нюансы и сложности капитального ремонта медицинских учреждений при условии их функционирования: от недостаточной информативности нормативной базы до организации ремонтно-строительных работ [9, 10].

Сегодня перед проектировщиками стоит сложная задача — увязать между собой в решениях множество аспектов. На тему подходов к проектированию медицинских учреждений существуют исследования, учитывающие эргономичность, энергоэффективность и т.д. [11–16]. Однако, несмотря на наличие литературы, а также рекомендаций по использованию тех или иных решений, вопросы комплексного анализа подходов к проектированию медицинских учреждений, применяемых при капитальном ремонте, сохраняют свою актуальность.

Цель данной статьи — анализ основных подходов к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения поставленной цели применялись следующие методы исследования:

- анализ нормативно-технической документации, используемой при проектировании и осуществ-

лении работ по капитальному ремонту медицинских учреждений;

- изучение опыта проведения капитального ремонта на примере реальных объектов. Был рассмотрен ряд государственных бюджетных учреждений здравоохранения Москвы. В данных объектах компанией ООО «АФА ГЕНПРОЕКТ» разрабатывалась проектная и рабочая документация для дальнейшего выполнения работ по капитальному ремонту.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа авторы выделяют 6 основных подходов к проектированию медицинских учреждений при выполнении капитального ремонта, представленных схематично на рис. 1.

Безопасность

Обеспечение безопасности — ключевое требование, предъявляемое ко всем зданиям и сооружениям на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Основные требования содержатся в Федеральном законе от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Обеспечение безопасности — комплексное понятие, учитывающее такие аспекты, как:

1. Механическая безопасность

Строительные конструкции и основания должны обладать необходимой прочностью и устойчивостью, чтобы во время строительства и эксплуатации не возникало угрозы причинения вреда здоровью и жизни людей. Регламентируется значительным количеством нормативных документов: СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции», СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» и др.

В рамках обеспечения механической безопасности зданий проводятся обследования для оценки технического состояния элементов здания, в том числе несущих конструкций. В случае определения неудовлетворительного состояния конструкций выполняются ремонтно-восстановительные работы: усиление, замена отдельных элементов или полная замена конструкции. На рис. 2 показана схема усиления сборной многослойной плиты перекрытия



Рис. 1. Основные подходы к проектированию капитального ремонта медицинских учреждений

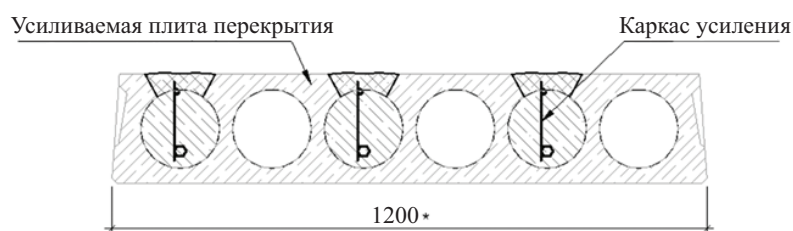


Рис. 2. Схема усиления сборной многопустотной плиты перекрытия

одного из объектов путем замоноличивания пустот с установкой арматурных каркасов.

2. Противопожарная безопасность

Включает в себя принятые меры и решения, направленные на предупреждение пожара, ограничение его распространения в случае возникновения и минимизацию последствий. Регламентируется такими нормативными документами, как Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», СП 112.13330.2011 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», СП 1.13130.2020 «Система противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (с Изменениями № 1–3)» и др.

3. Санитарно-гигиеническая безопасность

Включает меры и решения, направленные на ограничение распространения инфекционных агентов и патогенов внутри медицинских учреждений, проникновения вредоносных микроорганизмов в окружающую среду и устранение негативных факторов внешней среды, вредных для человеческого организма: химические активные вещества, бактерии, вирусы и т.д. Так, в одной из предыдущих работ авторов

анализировались отделочные решения помещений лучевой диагностики при проведении капитального ремонта с учетом разных требований, в том числе санитарно-гигиенических [17].

Энергоэффективность

Энергосбережение становится все более актуальной задачей в мире из-за роста населения, экономической активности и высоких темпов потребления ресурсов [18–20]. Данное направление в строительстве регламентируется Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». В документе закреплено понятие «*энергетическая эффективность*». Под ней подразумевают характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта.

В широком понятии под энергоэффективностью в строительстве понимают совокупность ре-



Рис. 3. Фрагмент фасада объекта, где проводятся работы по монтажу системы навесных фасадов

шений и методов, ориентированных на снижение потребления энергии и оптимизацию использования ресурсов как в процессе строительства, так и в период эксплуатации зданий, при этом не снижая уровень качества условий пребывания человека в здании. При проведении капитального ремонта медицинских учреждений можно выделить следующие мероприятия по повышению энергоэффективности:

1. Снижение теплопотерь

Снижение теплопотерь осуществляется путем теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и использования энергоэффективных дверей и окон, обеспечивающих лучшую изоляцию и снижающих теплопотери. На рис. 3 представлен фрагмент фасада одного из рассматриваемых авторами объектов, где при капитальном ремонте применялась система навесного вентилируемого фасада (НВФ). В качестве отделки использовалась облицовочная керамогранитная плитка, а в качестве утеплителя — минераловатные плиты, плотностью не менее 90 кг/м³. Между материалом отделки и утеплителем присутствовал вентиляционный зазор, где свободно циркулировал воздух.

2. Модернизация системы отопления

Осуществляется замена котлов и радиаторов отопления, а также происходит оснащение отопительных

приборов индивидуальными автоматическими регуляторами теплового потока (термостатами).

3. Замена освещения

Замена ламп накаливания и люминесцентных светильников на светодиодные позволяет снизить потребление энергии.

4. Модернизация системы вентиляции и кондиционирования

Одно из решений — установка умных систем управления. Они управляют работой всего оборудования в инженерной сети и поддерживают нужные параметры воздуха благодаря информации от датчиков. Такие системы способны регулировать интенсивность подачи воздуха, минимизировать перерасход электроэнергии и поддерживать комфортные условия круглосуточно.

Доступность для маломобильных групп населения

Формирование комфортной и безопасной среды обитания для всех категорий граждан, включая маломобильные группы населения (МГН) — одна из главных задач современного проектирования [21, 22]. Согласно нормативной документации, к МГН относятся люди, испытывающие затруднения при самостоятельном передвижении, получении услуги, необходимой информации или при ориентировании в пространстве. При проектировании особое место

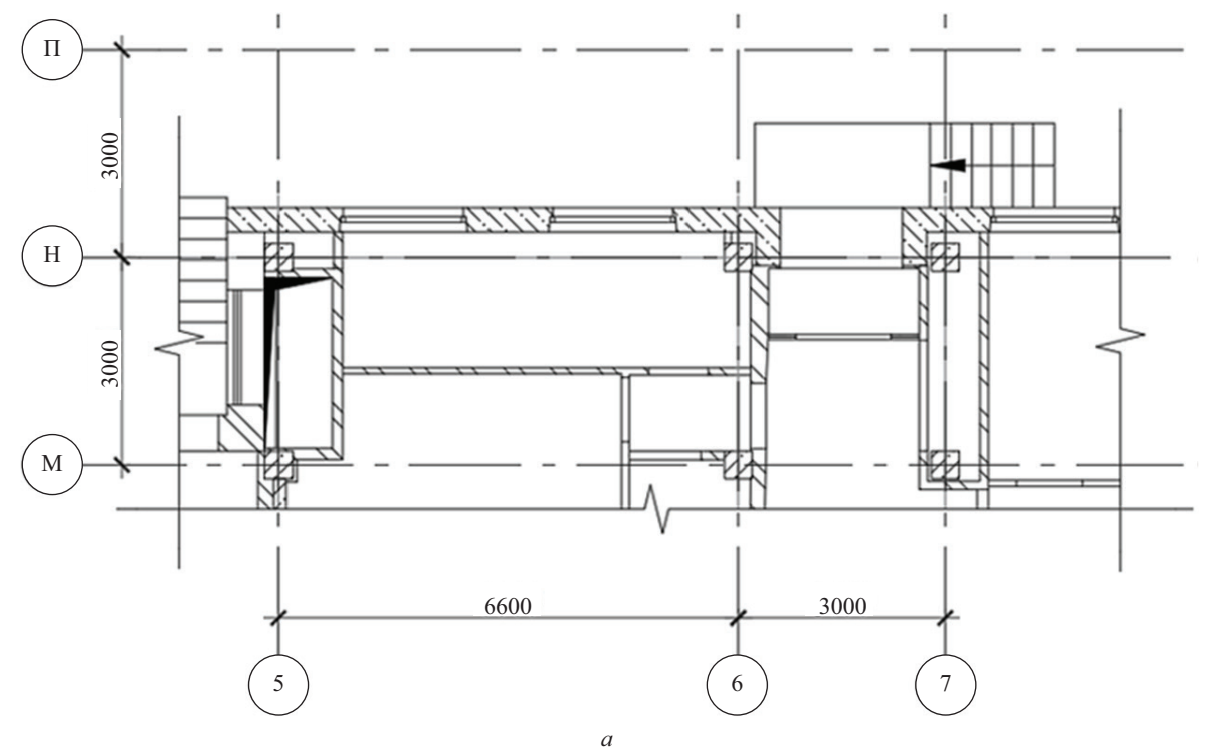
Аспекты проектирования с учетом требований для маломобильных групп населения

Аспекты проектирования	Примеры мероприятий, проводимых в рамках капитального ремонта
Входные группы	Устройство пандусов и подъемников. Устройство широких дверных проемов. Устройство автоматических дверей
Внутренняя ориентация и навигация	Четкая визуальная разметка и графические символы, понятные людям с ограниченными возможностями зрения. Контрастные цвета стен и полов для облегчения ориентации слабовидящих пациентов. Использование аудионавигации и голосовых подсказок в коридорах и лифтах. Устройство тактильных табличек и пиктограмм, выполненных шрифтом Брайля
Пути передвижения	Отсутствие порогов. Обеспечение достаточной ширины коридоров. Устройство полов из нескользящих материалов, гладких и устойчивых к износу. Наличие лифтов, предусматривающих перевозку людей на инвалидных колясках
Санитарно-гигиенические помещения	Устройство инвалидных душевых комнат. Устройство поручней, рычагов для спуска воды и др. Установка зеркал и раковин на оптимальную высоту
Мебель и технические средства	Использование специальной мебели и технических средств реабилитации
Парковка	Выделение специальных парковочных мест, отмеченных соответствующими знаками

занимает СП 59.13330.2020 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01–2001», который включен в перечень обязательных к применению строительных стандартов и сводов правил. В документе установлены основные требования, предъявляемые к проектированию зданий и сооруже-

ний для обеспечения должного уровня доступности для МГН. В контексте капитального ремонта медицинских учреждений можно выделить следующие примеры мероприятий по обеспечению доступности для МГН, указанные в таблице.

На рис. 4 приведены фрагменты плана первого этажа одного из исследуемых объектов, где в про-



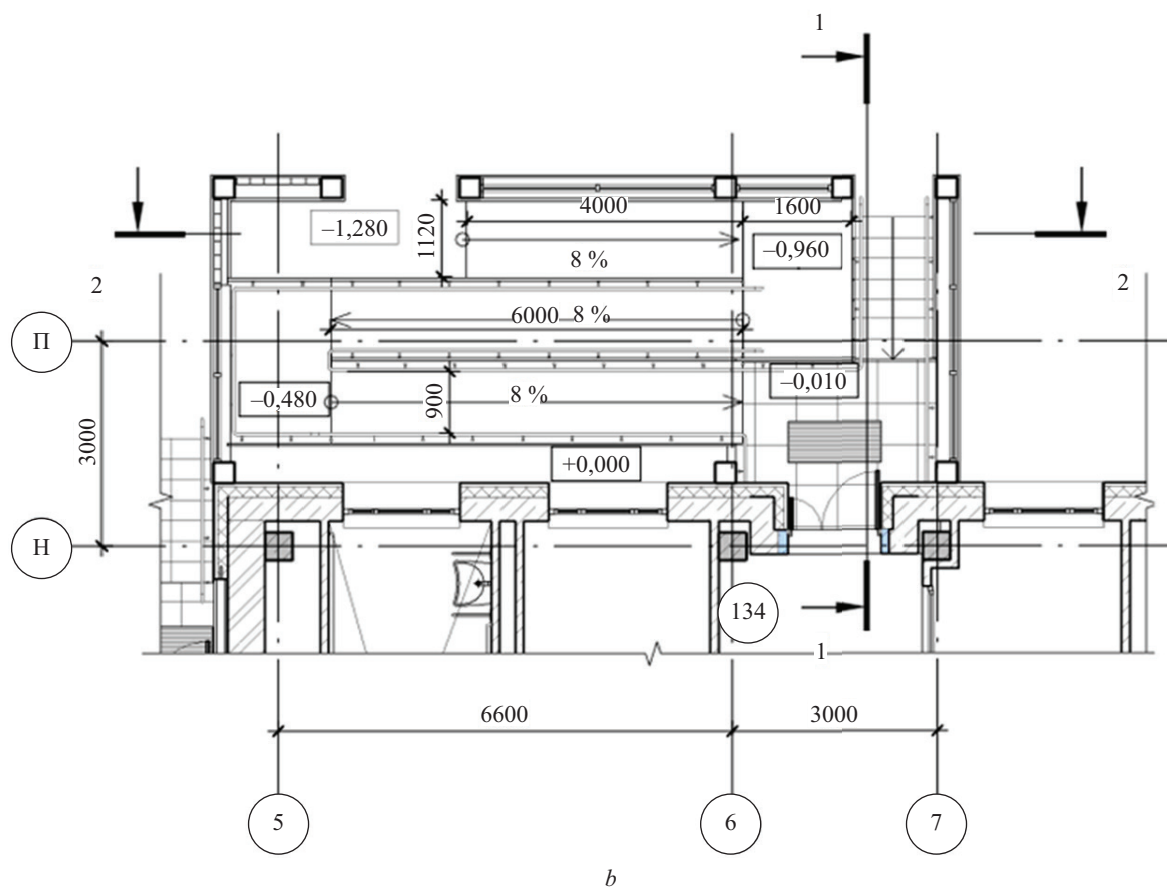


Рис. 4. Фрагмент плана входной группы: *a* — фрагмент плана до капитального ремонта; *b* — после проведения капитального ремонта

цессе капитального ремонта входные группы здания модернизировали с целью обеспечения доступности для МГН.

На рис. 5 показана жилая ячейка для размещения МГН одного из рассматриваемых авторами объектов, предоставляющих медицинскую помощь в стационарных условиях, в которой предусмотрены санитарно-гигиенические помещения, учитывающие особенности МГН, а также имеющие специальные технические краны для поднятия таких пациентов с кровати и посадки в кресло.

Единообразие архитектурных, дизайнерских и объемно-планировочных решений

В последние годы в проектировании социальных объектов, включая медицинские учреждения, при новом строительстве, капитальном ремонте и реконструкции наблюдается тенденция единообразия в объемно-планировочных, архитектурных и дизайнерских решениях. Данные решения разрабатываются на основе единой концепции, единого подхода, фирменного стиля, представленных в таких документах, как брендбук, гайдлайн или логобук.

Ярким примером единообразия при капитальном ремонте медицинских учреждений является московский проект «Моя поликлиника», где в рамках проведения ремонтно-строительных работ здания

поликлиник приводят к единому фирменному стилю. На рис. 6 представлены фото отремонтированных зданий московских поликлиник, выполненных по единому стандарту.

Стоит отметить, что не только московские поликлиники модернизируются в едином стиле. Так, приказом Департамента труда и социальной защиты населения г. Москвы от 23.08.2024 внесены правки в единообразный подход к руководству по оформлению интерьеров социальных домов и геронтологических центров при комплексном капитальном ремонте. Также при проектировании капитального ремонта и новых учреждений группы компаний «Мать и дитя» использовался брендбук.

Среди достоинств такого подхода к проектированию можно выделить:

- формирование корпоративного имиджа;
- экономию времени и ресурсов — унификация решений сокращает время и ресурсы на разработку проектной и рабочей документации;
- удобство пользователей — единый стиль позволяет быстрее адаптироваться к пространству, облегчает ориентацию в здании, так как пространства, организованные по схожей схеме, становятся интуитивно понятными и удобными в использовании даже для впервые посещающего учреждение пациента.

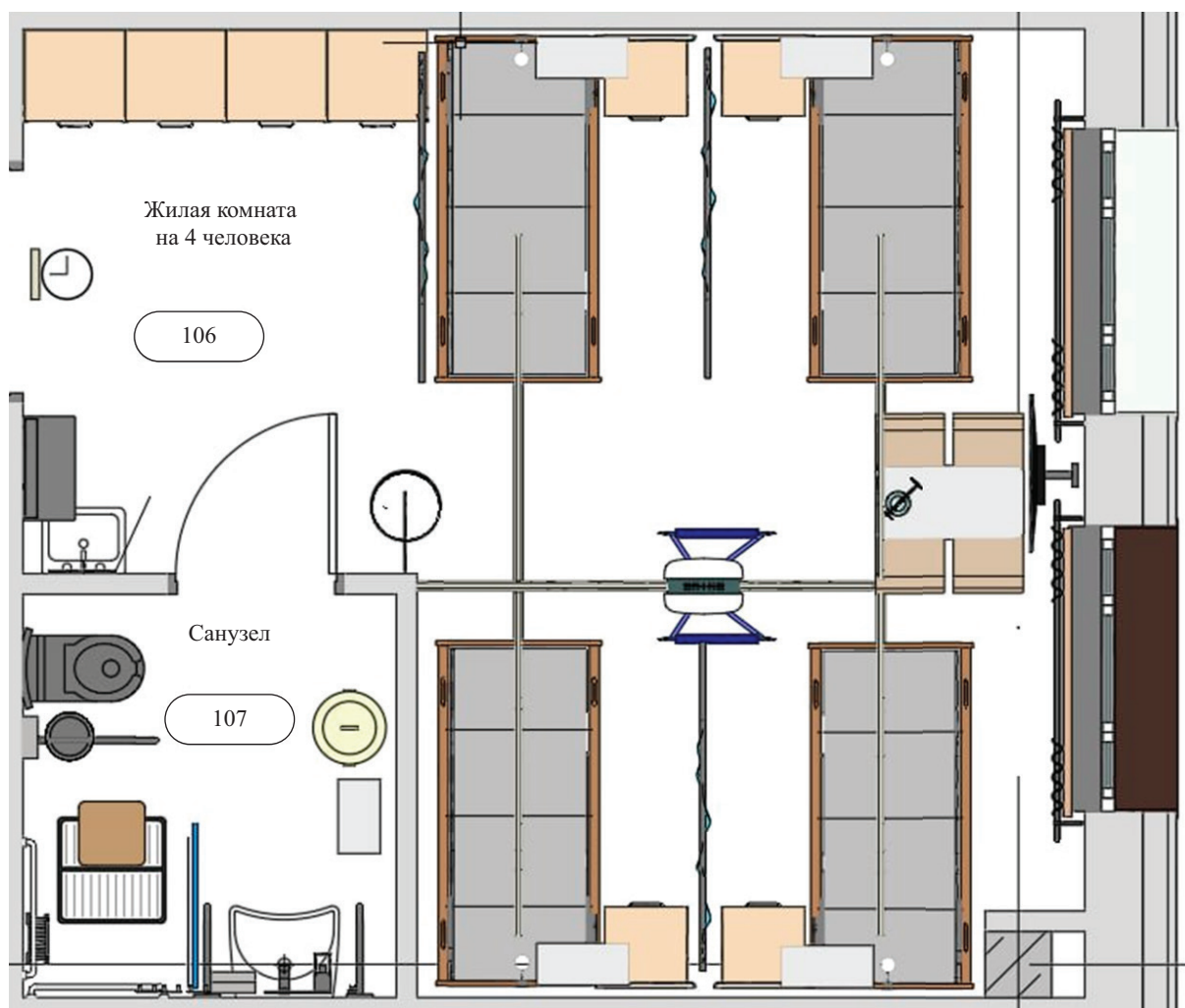


Рис. 5. Жилая ячейка для размещения маломобильных групп населения



Рис. 6. Здания московских поликлиник, выполненных по единому стандарту

Таким образом, применение единых решений в объемно-планировочных, архитектурных и интерьерных решениях дает возможность обеспечить высокую степень организованности, предсказуемости и удобства как при проектировании и реализации проекта, так и при эксплуатации.

Функциональность

В контексте медицинских учреждений под функциональностью можно понять следующее: здание

должно вмещать всех необходимых специалистов, лабораторные и диагностические подразделения, пункты выдачи лекарств и прочие сервисы, что исключает необходимость обращения пациентов в другие учреждения. При таком подходе обеспечивается быстрый и эффективный доступ пациентов к необходимым услугам, минимизируются транспортные затраты и улучшается общее восприятие качества медицинской помощи. Создаются четкие пути сле-

дования для пациентов и медицинских работников, исключаются пересечение и смешивание потоков.

Комфорт

Важно понимать, что комфорт медицинского учреждения должен охватывать не только пациентов, но и медицинский персонал. Рабочее пространство сотрудников необходимо организовывать таким образом, чтобы обеспечить быстрый доступ к оборудованию, документам и лекарствам, уменьшив физические нагрузки и стресс.

Просторные палаты для пациентов, оснащенные удобной мебелью и обеспечивающие хороший воздухообмен, светлые тона стен и потолков, визуально расширяющие помещение и создающие ощущение простора и чистоты, использование экологически чистых и гипоаллергенных материалов, легко очищаемых и стойких к агрессивным средствам дезинфекции, отсутствие перегруженности пространства, понятная навигация внутри здания — все это способствует снижению стресса и созданию благоприятной среды для выздоровления пациентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Капитальный ремонт — один из ключевых аспектов модернизации системы здравоохранения, позволяющий повысить эксплуатационные характеристики зданий, а также уровень соответствия современным требованиям к качеству оказываемых медицинских услуг. Ключевыми задачами модернизации являются обеспечение функциональности медицинского учреждения, а также формирование

безопасной и комфортной среды как для пациентов, так и для персонала.

Проектирование капитального ремонта медицинских учреждений требует учета множества факторов и требований. Перед проектировщиками стоит непростая задача — создание баланса решений, органично сочетающихся друг с другом и соответствующих современным тенденциям в здравоохранении.

В данной статье на примере строящихся и реализованных объектов авторами исследованы подходы к проектированию медицинских учреждений при проведении капитального ремонта, выделено шесть подходов: обеспечение механической, санитарно-гигиенической и противопожарной безопасности; создание комфортного пространства; достижение функциональности здания для эффективной организации труда; обеспечение доступности объекта для МГН; реализация мер по энергосбережению и рациональному расходованию энергетических ресурсов; соблюдение единых архитектурных, объемно-пространственных и интерьерных решений для медицинских учреждений, объединенных общностью типа либо организационной принадлежностью.

На вышеперечисленные подходы следует ориентироваться проектировщикам при проектировании медицинских учреждений при проведении капитального ремонта. Они позволяют значительно увеличить качество отремонтированных медицинских учреждений, повысить комфортность и безопасность пребывания пациентов и персонала, а также способствуют экономии ресурсов и увеличению продолжительности ЖЦ зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов А.Е. Современные проблемы качества медицинской помощи : обзор литературы // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. № 1. С. 4–1. DOI: 10.12737/8114. EDN TMEQUN.

2. Чукунова С.М. Оценка показателей качества оказания медицинских услуг в медицинской коммерческой организации (опыт эмпирического изучения деятельности стоматологической клиники) // Научные труды Северо-Западного института управления РАНХиГС. 2019. Т. 10. № 2 (39). С. 231–236. EDN KJZDYI.

3. Бадма-Гаряев М.С. Роль совершенствования материально-технической базы многопрофильной больницы в повышении эффективности ее деятельности // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2015. Т. 23. № 5. 43–45. EDN UYCSJB.

4. Большой И.Н. Проблемы организации и повышения качества стоматологической помощи (по материалам социологического опроса врачей-стоматологов) // Проблемы стоматологии. 2016. Т. 12. № 1.

С. 110–114. DOI: 10.18481/2077-7566-2016-12-1-110-114. EDN VSENBW.

5. Olanrewaju A., Fang W.W., Tan S.Y. Hospital Building Maintenance Management Model // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7. Issue 2.29. P. 747. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.29.14010

6. Martínez F.C.C. Empirical investigation of indoor environmental quality (IEQ) in a hospital building in Merida Yucatan, Mexico // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7. Issue 3.11. P. 245. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.11.16018

7. Siddiqui Z.K., Zuccarelli R., Durkin N., Wu A.W., Brotman D.J. Changes in patient satisfaction related to hospital renovation: experience with a new clinical building // Journal of Hospital Medicine. 2015. Vol. 10. Issue 3. Pp. 165–171. DOI: 10.1002/jhm.2297

8. Кузьмина Т.К., Тарханян Т.А., Бабушкина Д.Д., Мезенцев А.С. Факторы, влияющие на эффективность проведения капитального ремонта объектов здравоохранения // Инженерный вестник Дона. 2024. № 1 (109). С. 258–268. EDN JKFLGH.

9. Ратушный И.О., Ивакина Ю.Ю. Анализ проблем в организации капитального ремонта медицинских учреждений при условии их функционирования // Инженерный вестник Дона. 2024. № 11 (119). С. 549–559. EDN WBOZOI.

10. Ратушный И.О., Ивакина Ю.Ю. Анализ проблемы недостаточной информативности нормативной документации в области организации и проведения капитального ремонта медицинских учреждений при условии их функционирования // Инженерный вестник Дона. 2025. № 1 (121). С. 347–356. EDN IXVRGH.

11. Корниенко С.В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 11 (26). С. 33–48. EDN TEDZEJ.

12. Сулайманова Ж.А., Куржумбаева Р.Б. Повышение энергоэффективности зданий и сооружений в Кыргызской Республике // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2021. № 1 (57). С. 34–41. EDN EFRWEN.

13. Шеина С.Г., Федоровская А.А., Калиткин А.П. Строительство объектов здравоохранения с использованием энергоэффективных технологий // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2022. Т. 1. № 2. С. 13–22. DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-13-2. EDN QJJMIX.

14. Кузова В.А. Проблемы создания доступной среды для маломобильных групп населения в Приморском крае // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2016. Т. 8. № 1 (32). С. 183–189. EDN VQWKDH.

15. Бажухина А.Д., Клещевникова Т.М., Курмангулов А.А., Сафонов Д.А. Визуализация при организации доступной среды объектов здравоохранения: организационно-правовой аспект // Забайкальский медицинский вестник. 2024. № 1.

С. 120–126. DOI: 10.52485/19986173_2024_1_120. EDN UNBWXN.

16. Матовников С.А., Борзенко С.Е., Картавец Я.С. Дизайн медицинского учреждения как необходимый элемент лечебного процесса // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 3 (76). С. 149–156. EDN NIZTDP.

17. Ивакина Ю.Ю., Ратушный И.О. Отделочные решения, применяемые при проведении капитального ремонта помещений лучевой диагностики в медицинских учреждениях // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № 3. С. 16. DOI: 10.15862/19SAVN325. EDN JOZNOW.

18. Dion H., Evans M., Farrell P. Hospitals management transformative initiatives; towards energy efficiency and environmental sustainability in healthcare facilities // Journal of Engineering, Design and Technology. 2023. Vol. 21. Issue 2. Pp. 552–584. DOI: 10.1108/JEDT-04-2022-0200

19. Harputlugil T., de Wilde P. The interaction between humans and buildings for energy efficiency : a critical review // Energy Research & Social Science. 2021. Vol. 71. P. 101828. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101828

20. Arowoiya V.A., Moehler R.C., Fang Y. Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions // Energy and Built Environment. 2024. Vol. 5. Issue 5. Pp. 641–656. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.05.004

21. Kovtunen O. Ensuring accessibility of territorial community infrastructure for low-mobility population groups // Scientific Journal of Polonia University. 2024. Vol. 65. Issue 4. Pp. 185–193. DOI: 10.23856/6521

22. Sharma A., Kumar K. A Review of Barrier-Free Design in Built Environment // International Journal of Multidisciplinary Innovative Research. 2022. Vol. 2. Issue 1. Pp. 33–37.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Юрьевна Ивакина** — кандидат технических наук, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ivakinaYY@mgsu.ru;

Иван Олегович Ратушный — аспирант кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; архитектор 2-й категории; **АФА ГЕНПРОЕКТ**; 129085, г. Москва, ул. Годовикова, д. 9, стр. 2; ivan.ratushny25@gmail.com.

Вклад авторов:

Ивакина Ю.Ю. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, научное редактирование.

Ратушный И.О. — идея, сбор материалов для исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Studies show that the level of material and technical support for medical institutions plays a major role in providing high-quality and timely medical care that satisfies the country's population [1–4]. With a significant level of physical and/or moral wear and tear, the buildings of medical institutions cease to meet modern sanitary and hygienic standards: it becomes impossible to use new medical technological equipment, the microclimate parameters of the premises deteriorate, and the level of comfort and safety of patients decreases [5, 6].

The overhaul of medical facilities is an important component of maintaining the high-quality functioning of the healthcare system [7]. This is a complex process that requires consideration of many factors that affect the effectiveness of the task at hand [8]. In previous studies, the authors examined the nuances and complexities of major repairs to medical facilities while they remain in operation: from the lack of information in the regulatory framework to the organization of repair and construction work [9, 10].

Today, designers face the difficult task of coordinating many aspects in their decisions. There are studies on approaches to the design of medical facilities that take into account ergonomics, energy efficiency, etc. [11–16]. However, despite the availability of literature and recommendations on the use of certain solutions, issues related to the comprehensive analysis of approaches to the design of medical facilities used in major repairs remain relevant.

The purpose of this article is to analyze the main approaches to the design of medical facilities during major renovations.

MATERIALS AND METHODS

The following research methods were used to achieve the set goal:

- analysis of regulatory and technical documentation used in the design and implementation of major repairs of medical facilities;
- study of the experience of major repairs using real facilities as examples. A number of state-funded healthcare institutions in Moscow were examined. For these facilities, AFA GENPROEKT LLC developed design and working documentation for further major repairs.

RESULTS OF THE STUDY

Based on the analysis, the authors identify six main approaches to the design of medical facilities during major repairs, which are presented schematically in Fig. 1.

Safety

Ensuring safety is a key requirement for all buildings and structures at all stages of their life cycle (LC). The main requirements are contained in Federal Law No. 384-FZ of 30 December 2009, “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures”. Ensuring safety is a complex concept that takes into account aspects such as:

1. Mechanical safety

Building structures and foundations must have the necessary strength and stability so that during construction and operation there is no threat of harm to human health and life. This is regulated by a significant number of regulatory documents: CP 70.13330.2012 “Load-bearing

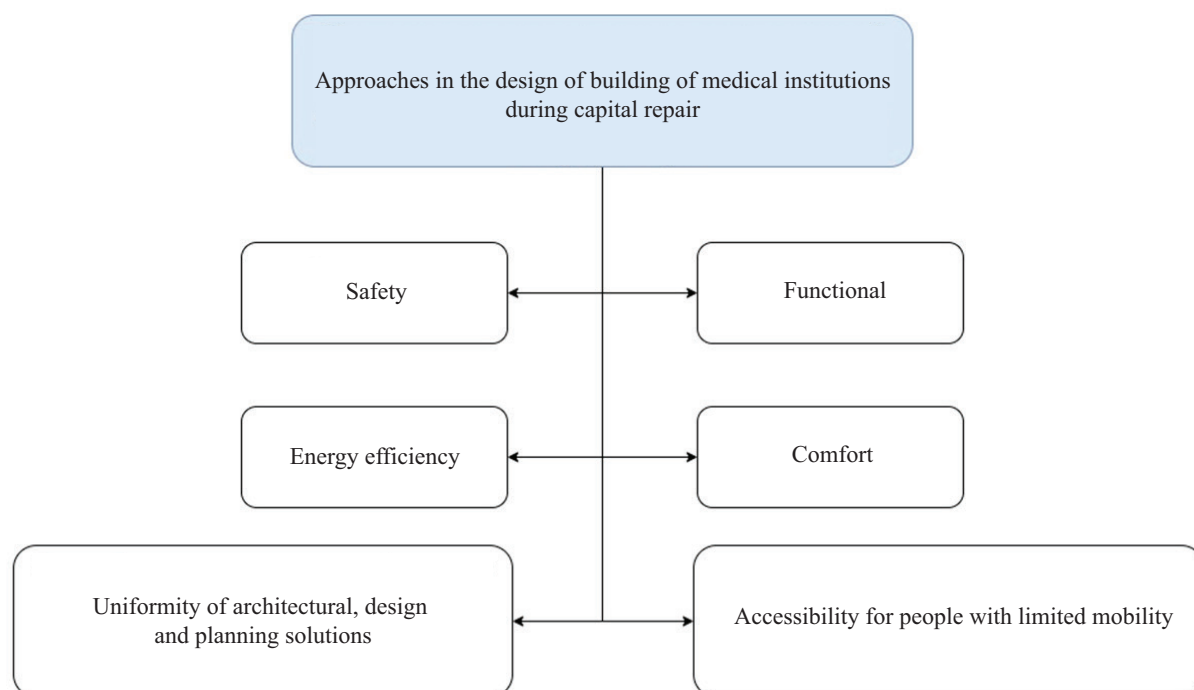


Fig. 1. Main approaches to the design of major repairs of medical facilities

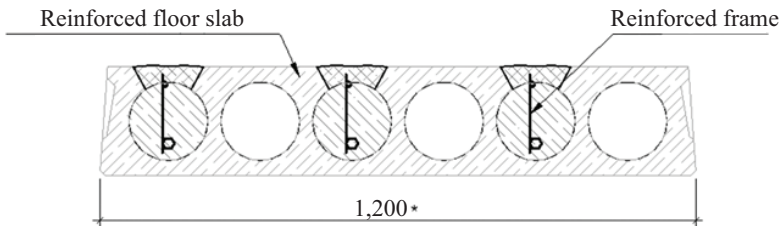


Fig. 2. Reinforcement diagram for a prefabricated hollow core floor slab

and enclosing structures”, CP 16.13330.2017 “Steel Structures”, CP 63.13330.2018 “Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions”, CP 64.13330.2017 “Wooden Structures”, etc.

As part of ensuring the mechanical safety of buildings, inspections are carried out to assess the technical condition of building elements, including load-bearing structures. If the condition of the structures is found to be unsatisfactory, repair and restoration work is carried out: reinforcement, replacement of individual elements or complete replacement of the structure. Fig. 2 shows a diagram of the reinforcement of a prefabricated hollow core floor slab at one of the facilities by grouting the voids and installing reinforcement cages.

2. Fire safety

Includes measures and solutions aimed at preventing fires, limiting their spread in the event of an out-

break, and minimizing their consequences. Regulated by such normative documents as Federal Law No. 123-FZ of 22 July 2008 “Technical Regulations on Fire Safety Requirements”, CP 112.13330.2011 “Fire Safety of Buildings and Structures”, CP 1.13130.2020 “Fire Protection System. Evacuation Routes and Exits (with Amendments No. 1–3)”, etc.

3. Sanitary and hygienic safety

Includes measures and solutions aimed at limiting the spread of infectious agents and pathogens within medical institutions, the penetration of harmful microorganisms into the environment, and the elimination of negative environmental factors harmful to the human body: chemically active substances, bacteria, viruses, etc. Thus, in one of the authors’ previous works, finishing solutions for radiology rooms undergoing major repairs



Fig. 3. Fragment of the facade of the facility where work is being carried out to install a curtain wall system

were analyzed, taking into account various requirements, including sanitary and hygienic ones [17].

Energy efficiency

Energy conservation is becoming an increasingly pressing issue worldwide due to population growth, economic activity and high rates of resource consumption [18–20]. This area of construction is regulated by Federal Law No. 261-FZ of 23 November 2009 (as amended on 13 June 2023) “Energy Saving and Energy Efficiency Improvement, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation”. The document establishes the concept of “*energy efficiency*”. This refers to characteristics that reflect the ratio of the beneficial effect of energy resource use to the energy resources expended to achieve that effect.

In a broad sense, energy efficiency in construction is understood as a set of solutions and methods aimed at reducing energy consumption and optimizing the use of resources both during the construction process and during the operation of buildings, without reducing the quality of the conditions for people in the building. When carrying out major repairs to medical facilities, the following measures to improve energy efficiency can be identified:

1. Reducing heat loss

Heat loss is reduced by insulating the building envelope and using energy-efficient doors and windows, which provide better insulation and reduce heat loss. Fig. 3 shows a fragment of the facade of one of the buildings considered by the authors, where a ventilated curtain wall system (VCS) was used during major repairs. Porcelain stoneware tiles were used as a finish, and mineral wool slabs with a density of at least 90 kg/m³ were used as insulation. There was a ventilation gap between the finishing material and the insulation, where air circulated freely.

2. Modernization of the heating system

Boilers and radiators are being replaced, and heating devices are being equipped with individual automatic heat flow regulators (thermostats).

3. Replacement of lighting

Replacing incandescent and fluorescent lamps with LED lamps reduces energy consumption.

4. Modernization of the ventilation and air conditioning system

One solution is to install smart control systems. These control the operation of all equipment in the engineering network and maintain the required air parameters based on information from sensors. Such systems are capable of regulating air flow intensity, minimizing energy overconsumption and maintaining comfortable conditions around the clock.

Accessibility for people with reduced mobility

Creating a comfortable and safe living environment for all categories of citizens, including people with reduced mobility (PRM), is one of the main tasks of modern design [21, 22]. According to regulatory documentation, people with reduced mobility are those who have difficulty moving independently, obtaining services, necessary information, or orienting themselves in space. CP 59.13330.2020 “Accessibility of buildings and structures for people with reduced mobility. Updated version of SNiP 35-01–2001”, which is included in the list of mandatory construction standards and codes. The document establishes the basic requirements for the design of buildings and structures to ensure an adequate level of accessibility for people with reduced mobility. In the context of major repairs to medical facilities, the following examples of measures to ensure accessibility for people with reduced mobility, listed in the Table, can be highlighted.

Design aspects taking into account the requirements for people with reduced mobility

Design aspects	Examples of measures carried out as part of major repairs
Entrance areas	Installation of ramps and lifts. Installation of wide doorways. Installation of automatic doors
Internal orientation and navigation	Clear visual markings and graphic symbols that are understandable to people with visual impairments. Contrasting colours on walls and floors to facilitate orientation for visually impaired patients. Use of audio navigation and voice prompts in corridors and lifts. Installation of tactile signs and pictograms in Braille
Ways to get around	No thresholds. Ensure corridors are sufficiently wide. Floors made of non-slip materials that are smooth and wear-resistant. Elevators that can accommodate people in wheelchairs
Sanitary facilities	Installation of disabled shower rooms. Installation of handrails, levers for flushing water, etc. Installation of mirrors and sinks at an optimal height
Furniture and technical aids	Use of special furniture and technical rehabilitation equipment
Parking	Allocation of special parking spaces marked with appropriate signs

Fig. 4 shows fragments of the first-floor plan of one of the objects under study, where, during the course of major repairs, the building’s entrance areas were modernized to ensure accessibility for people with disabilities.

Fig. 5 shows a residential unit for accommodating people with limited mobility in one of the facilities considered by the authors that provide inpatient medical care. It includes sanitary and hygiene facilities that take into account the specific needs of people with limited

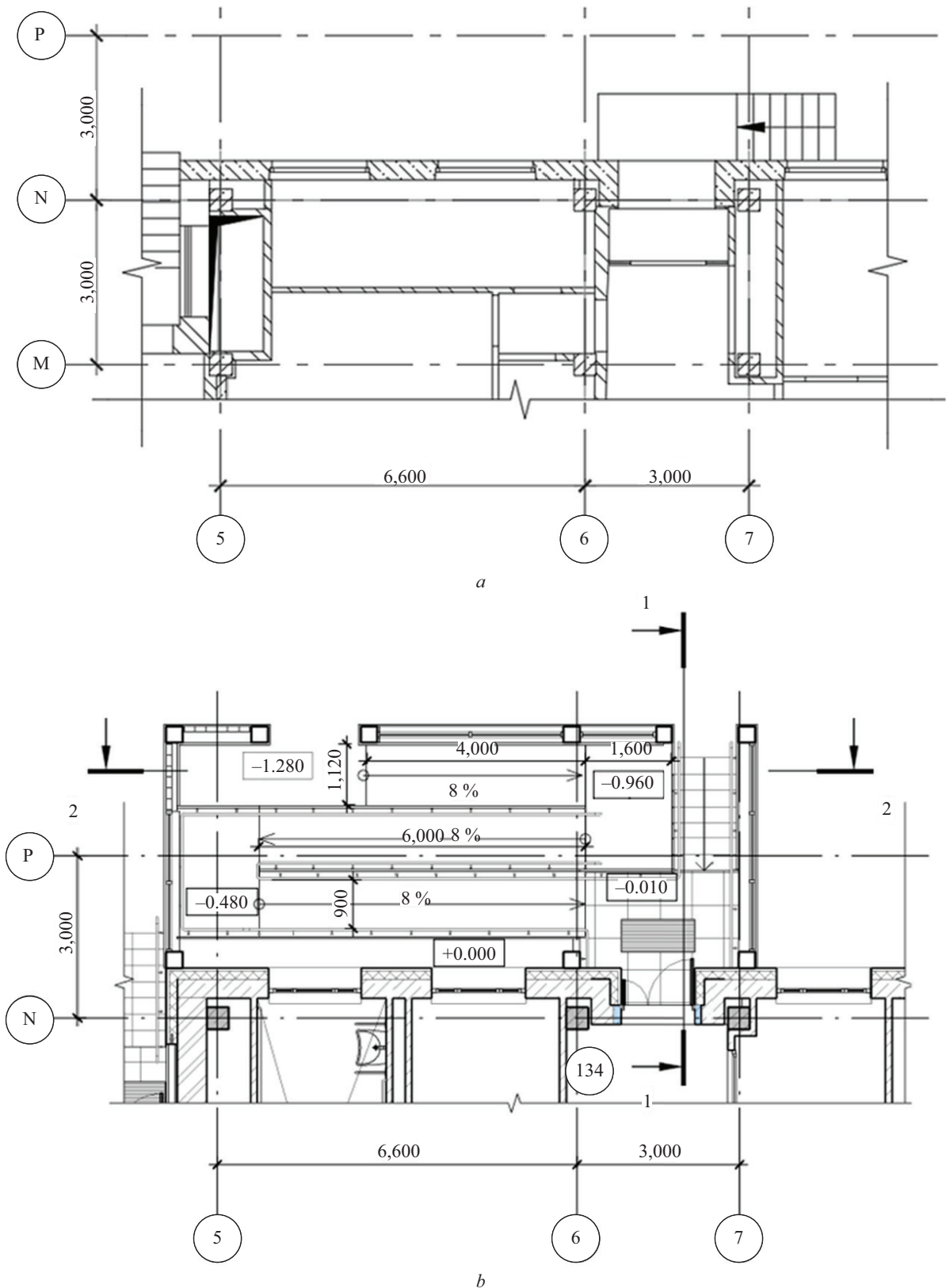


Fig. 4. Fragment of the entrance hall plan: *a* — fragment of the plan before major repairs; *b* — after major repairs

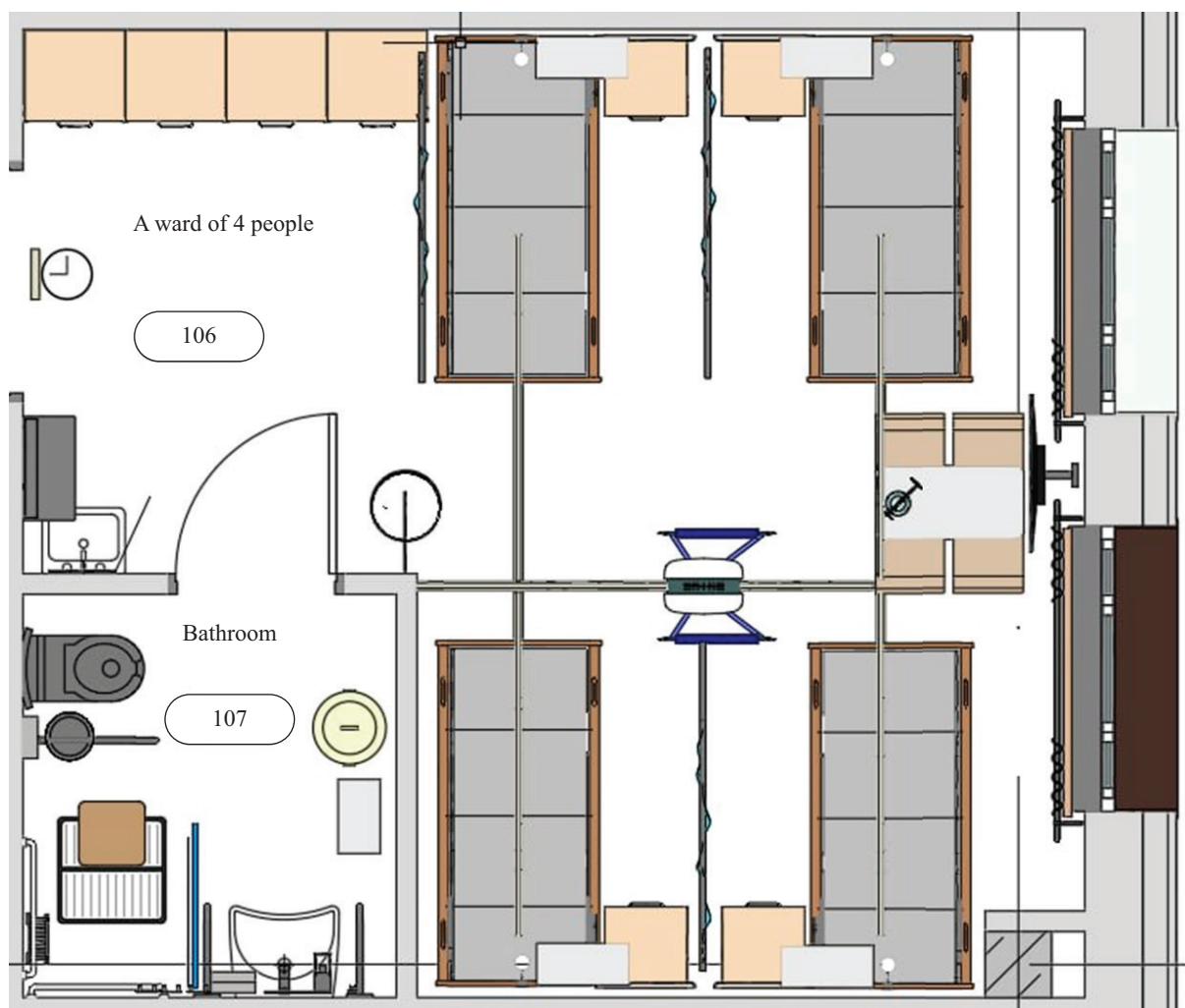


Fig. 5. Living quarters for people with limited mobility

mobility, as well as special technical cranes for lifting such patients from their beds and placing them in chairs.

Uniformity of architectural, design and spatial planning solutions

In recent years, there has been a trend towards uniformity in spatial planning, architectural and design solutions in the design of social facilities, including medical institutions, in new construction, major repairs and reconstruction. These solutions are developed on the basis of a unified concept, a unified approach, and a corporate style, as presented in documents such as brand books, guidelines, or logo books.

A striking example of uniformity in the major renovation of medical facilities is the Moscow project “My Polyclinic”, where, as part of the renovation and construction work, polyclinic buildings are brought into line with a single corporate style. Fig. 6 shows photos of renovated Moscow polyclinic buildings, built to a single standard.

It is worth noting that it is not only Moscow polyclinics that are being modernized in a uniform style. Thus, by order of the Moscow Department of Labour and Social Protection of the Population dated 23 August 2024, amendments were made to the uniform approach to the gui-

delines for the interior design of social homes and gerontological centres during comprehensive capital repairs. A brand book was also used in the design of major renovations and new facilities for the Mother and Child group of companies.

The advantages of this approach to design include:

- the formation of a corporate image;
- saving time and resources — standardizing solutions reduces the time and resources needed to develop project and working documentation;
- user convenience — a unified style allows users to adapt to the space more quickly and facilitates orientation in the building, as spaces organized according to a similar scheme become intuitive and easy to use, even for patients visiting the facility for the first time.

Thus, the use of uniform solutions in spatial planning, architectural and interior design solutions makes it possible to ensure a high degree of organization, predictability and convenience both in the design and implementation of the project and in its operation.

Functionality

In the context of medical facilities, functionality can be understood as follows: the building must accommo-



Fig. 6. Moscow polyclinic buildings renovated to a uniform standard

date all necessary specialists, laboratory and diagnostic departments, medicine dispensing points and other services, eliminating the need for patients to visit other facilities. This approach ensures fast and efficient access to necessary services for patients, minimizes transport costs and improves the overall perception of the quality of medical care. Clear routes are created for patients and medical staff, eliminating cross-traffic and mixing of flows.

Comfort

It is important to understand that the comfort of a medical facility should extend not only to patients but also to medical staff. The workspace for employees must be organized in such a way as to ensure quick access to equipment, documents and medicines, reducing physical strain and stress.

Spacious patient rooms equipped with comfortable furniture and providing good air exchange, light-coloured walls and ceilings that visually expand the room and create a feeling of space and cleanliness, the use of environmentally friendly and hypoallergenic materials that are easy to clean and resistant to aggressive disinfectants, no clutter, and clear navigation within the building all contribute to reducing stress and creating a favourable environment for patient recovery.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Major renovations are one of the key aspects of modernizing the healthcare system, allowing for improved

building performance and greater compliance with modern requirements for the quality of medical services provided. The key objectives of modernization are to ensure the functionality of the medical facility and to create a safe and comfortable environment for both patients and staff.

The design of major repairs to medical facilities requires consideration of many factors and requirements. Designers face the difficult task of creating a balance of solutions that fit together organically and correspond to modern trends in healthcare.

In this article, using the example of facilities under construction and completed projects, the authors examine approaches to the design of medical facilities undergoing major renovations, identifying six approaches: ensuring mechanical, sanitary, hygienic, and fire safety; creating a comfortable space; achieving building functionality for effective work organization; ensuring accessibility for people with disabilities; implementing energy-saving measures and rational use of energy resources; compliance with uniform architectural, spatial and interior design solutions for medical facilities that are similar in type or organizational affiliation.

Designers should be guided by the above approaches when designing medical facilities during major renovations. They make it possible to significantly improve the quality of renovated medical facilities, increase the comfort and safety of patients and staff, and contribute to resource savings and an increase in the life cycle of buildings.

REFERENCES

1. Orlov A.E. Modern problems of medical care quality : review of literature. *Journal of New Medical Technologies*. 2015; 1:4-1. DOI: 10.12737/8114. EDN TMEQUN. (rus.).
2. Chikunova S.M. Assessment of quality indicators for the provision of medical services in a medical commercial organization (experience of an empirical study of the activities of a dental clinic). *Scientific Works of North-West Institute of Management of RANEPa*. 2019; 10(2):(39):231-236. EDN KJZDYI. (rus.).
3. Badma-Gariaev M.S. The role of development of material and technical resources of multifield hospital and its impact on effectiveness of institution functioning. *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine*. 2015; 23(5):43-45. EDN UYCSJB. (rus.).
4. Bolshov I.N. Problems of organizing and improving the quality of dental care (based on the materials of social interview of dentists). *Actual Problems in Dentistry*. 2016; 12(1):110-114. DOI: 10.18481/2077-7566-2016-12-1-110-114. EDN VSENWB. (rus.).

5. Olanrewaju A., Fang W.W., Tan S.Y. Hospital Building Maintenance Management Model. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(2.29):747. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.29.14010
6. Martínez F.C.C. Empirical investigation of indoor environmental quality (IEQ) in a hospital building in Merida Yucatan, Mexico. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(3.11):245. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.11.16018
7. Siddiqui Z.K., Zuccarelli R., Durkin N., Wu A.W., Brotman D.J. Changes in patient satisfaction related to hospital renovation: experience with a new clinical building. *Journal of Hospital Medicine*. 2015; 10(3):165-171. DOI: 10.1002/jhm.2297
8. Kuzmina T.K., Tarkhanyan T.A., Babuskina D.D., Mezentsev A.S. Factors affecting the effectiveness of major repairs of healthcare facilities. *Engineering journal of Don*. 2024; 1(109):258-268. EDN JKFLGH. (rus.).
9. Ratushny I.O., Ivakina Yu.Yu. Analysis of problems in the organization of capital repairs of medical institutions under the condition of their operation. *Engineering journal of Don*. 2024; 11(119):549-559. EDN WBOZOI. (rus.).
10. Ratushny I.O., Ivakina Y.Y. Analysis of the problem of lack of informativity of the regulatory documents about organization and realization of capital repair of medical institutions in the conditions of their functioning. *Engineering journal of Don*. 2025; 1(121):347-356. EDN IXVRGH. (rus.).
11. Korniyenko S.V. Comprehensive assessment of energy efficiency and thermal protection of buildings. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 11(26):33-48. EDN TEDZEJ. (rus.).
12. Sulaimanova J.A., Kurjumbaeva R.B. Increasing energy efficiency of buildings and structures in Kyrgyz Republic. *Izvestiya KSTU named after I. Razzakov*. 2021; 1(57):34-41. EDN EFRWEN. (rus.).
13. Sheina S.G., Fedorovskaya A.A., Kalitkin A.P. Construction of healthcare facilities using energy efficient technologies. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022; 1(2):13-22. DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-13-2. EDN QJMJIX. (rus.).
14. Kuzova V.A. The problem of creating an accessible environment for people with limited mobility in the Primorsky Region. The Territory of New Opportunities. *The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2016; 8(1):(32):183-189. EDN VQWKDH. (rus.).
15. Bazhukhina A.D., Kleschevnykova T.M., Kurmangulov A.A., Safonov D.A. Visualization of the accessible environment of healthcare facilities: organizational and legal aspect. *Transbaikal Medical Bulletin*. 2024; 1:120-126. DOI: 10.52485/19986173_2024_1_120. EDN UNBWXN. (rus.).
16. Matovnikov S.A., Borzenko S.E., Kartavtseva Ya.S. Design medical institutions as an essential element of the treatment process. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. *The Construction and Architecture*. 2019; 3(76):149-156. EDN NIZTDP. (rus.).
17. Ivakina Yu.Yu., Ratushny I.O. Design solutions used in capital repair of radiation diagnostics rooms in medical facilities. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025; 17(3):16. DOI: 10.15862/19SAVN325. EDN JOZNOW. (rus.).
18. Dion H., Evans M., Farrell P. Hospitals management transformative initiatives; towards energy efficiency and environmental sustainability in healthcare facilities. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2023; 21(2):552-584. DOI: 10.1108/JEDT-04-2022-0200
19. Harputlugil T., de Wilde P. The interaction between humans and buildings for energy efficiency : a critical review. *Energy Research & Social Science*. 2021; 71:101828. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101828
20. Arowoia V.A., Moehler R.C., Fang Y. Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. *Energy and Built Environment*. 2024; 5(5):641-656. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.05.004
21. Kovtunen O. Ensuring accessibility of territorial community infrastructure for low-mobility population groups. *Scientific Journal of Polonia University*. 2024; 65(4):185-193. DOI: 10.23856/6521
22. Sharma A., Kumar K. A Review of Barrier-Free Design in Built Environment. *International Journal of Multidisciplinary Innovative Research*. 2022; 2(1):33-37.

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Yulia Y. Ivakina** — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ivakinaYY@mgsu.ru;

Ivan O. Ratushny — postgraduate student of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; architect 2nd category; **AFA GENPROEKT**; build. 2, 9 Godovikova st., Moscow, 129085, Russian Federation; ivan.ratushny25@gmail.com.

Contribution of the authors:

Yulia Y. Ivakina — research concept, scientific editing of the text, supervision.

Ivan O. Ratushny — idea, data gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Необходимость использования имитации последствий нарушений в рамках обучения безопасным методам и приемам выполнения работ

Надежда Андреевна Субботина, Андрей Николаевич Никулин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Травматизм в строительной отрасли остается серьезной проблемой, особенно из-за высоких рисков, связанных с падениями с высоты, которые часто вызваны человеческим фактором. Для снижения уровня травматизма необходимо систематическое и качественное обучение работников, однако текущие программы подготовки не всегда обеспечивают должный уровень осведомленности о реальных рисках, что подчеркивает важность исследования эффективности существующих методов обучения.

Материалы и методы. В целях оценки результативности обучения разработаны анкета и тестирование, позволяющие выявить восприятие работниками опасностей и уровень остаточных знаний по охране труда. Результаты анкетирования и тестирования обработаны в Microsoft Office Excel.

Результаты. Анализ анкетирования на выявление отношения работников к различным опасностям показал, что работники не находят ценности в обучении по охране труда. В целом отсутствие обучения не является важным аспектом безопасности для работников. Проведенный корреляционный анализ анкетирования подтверждает важную взаимосвязь, которая прослеживается между различными видами обучения по охране труда. Проверка остаточных знаний установила, что знания работников снизились более чем на 30 % за 3–6 месяцев после последнего обучения по охране труда. Падение остаточных знаний может свидетельствовать о недостаточной мотивации сотрудников, нехватке практического применения изученного материала или о том, что обучение не было достаточно эффективным. Исследование показало, что зачастую на строительных площадках приоритет выполнения производственных задач устанавливается выше приоритета обеспечения собственной безопасности. Повышение приоритетности вопросов личной безопасности возможно при помощи изменения подходов к обучению по охране труда, следует уйти от формализма обучения и добавить имитацию последствий нарушений и моделирование несчастного случая в процессе обучения работников.

Выводы. Для повышения качества обучения в сфере безопасности необходимо внедрение практико-ориентированных подходов, таких как интерактивные практические занятия и симуляция несчастных случаев. Учебный полигон «Умный труд» предлагает инновационные методы, которые учитывают психологические аспекты и позволяют работникам глубже усваивать знания о безопасности, что способствует формированию безопасного поведения на рабочих местах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: падение с высоты, несчастный случай, имитация последствий нарушений, строительство, обучение безопасным методам и приемам выполнения работ, работы на высоте, безопасность, охрана труда, полигон «Умный труд»

Благодарности. Статья публикуется по результатам исполнения гранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 2025 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Субботина Н.А., Никулин А.Н. Необходимость использования имитации последствий нарушений в рамках обучения безопасным методам и приемам выполнения работ // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.8

Автор, ответственный за переписку: Надежда Андреевна Субботина, subbota_91@mail.ru.

The need to use simulations of the consequences of violations as part of training in safe working methods and techniques

Nadezhda A. Subbotina, Andrey N. Nikulin

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Injuries in the construction industry remain a serious problem, especially due to the high risks associated with falls from height, which are often caused by human factors. Systematic and high-quality training of workers is necessary to reduce the level of injuries, but current training programs do not always provide the proper level of awareness of real risks, which emphasizes the importance of studying the effectiveness of existing training methods.

Materials and methods. In order to assess the effectiveness of training, the authors developed a questionnaire and testing to identify workers' perception of hazards and the level of residual knowledge on labour protection. The results of the questionnaire and testing were processed in Microsoft Office Excel.

Results. Analysis of the questionnaire to identify the attitude of workers to various hazards showed that workers do not find the value of labour protection training. In general, the lack of training is not an important aspect of safety for workers. The conducted correlation analysis of the questionnaire confirms an important relationship that can be traced between different types of labour protection training. Checking the residual knowledge found that the knowledge of workers decreased by more than 30 % in 3–6 months after the last labour protection training. A drop in retained knowledge may indicate insufficient employee motivation, a lack of practical application of the material studied, or that the training was not effective enough. The study showed that often at construction sites, the priority of performing production tasks is set higher than the priority of ensuring one's own safety. Increasing the priority of personal safety issues is possible by changing approaches to occupational safety training - moving away from formalism of training and adding imitation of the consequences of violations and accident modeling in the process of training workers.

Conclusions. To improve the quality of safety training, it is necessary to introduce practice-oriented approaches, such as interactive practical classes and accident simulation. The "Smart Labour" Polygon offers innovative methods that take into account psychological aspects and allow workers to more deeply absorb knowledge about safety, which contributes to the formation of safe behavior in the workplace.

KEYWORDS: fall from height, accident, simulation of consequences of violations, construction, training in safe methods and techniques for performing work, work at height, safety, labour protection, "Smart Labour" Polygon

Acknowledgements. The article is published based on the results of the implementation of the grant of the Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering in 2025.

FOR CITATION: Subbotina N.A., Nikulin A.N. The need to use simulations of the consequences of violations as part of training in safe working methods and techniques. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.8

Corresponding author: Nadezhda A. Subbotina, subbota_91@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Травматизм в строительной отрасли остается актуальной проблемой современного общества. Строительство сопряжено с высокими рисками, которые могут привести к серьезным травмам и летальным исходам. По данным Всемирной организации здравоохранения и Министерства труда и социальной защиты РФ^{1, 2}, строительные площадки занимают одно из первых мест по количеству несчастных случаев на производстве, что подчеркивает необходимость внедрения эффективных мер по обеспечению безопасности труда. Строительная сфера отличается большими объемами работ, которые требуется выполнить, соблюдая сроки. Любая строительная площадка — это перечень работ повышенной опасности, которые осуществляются множеством бригад одновременно, что служит особенностью данной сферы экономики. Проблемам травматизма в строительстве посвящено большое количество публикаций, что подчеркивает важность исследований [1–4].

Анализируя статистические сведения² [3] и труды [5, 6], можно выделить основной вид происшествия, приводящий к тяжелому и смертельному

травматизму, на протяжении многих лет неизменным лидером является падение с высоты, причины падений зачастую — человеческий фактор [7–11].

Один из наиболее действенных способов снижения уровня травматизма по причине человеческого фактора, по мнению авторов, — систематическое обучение работников. Качественное обучение не только повышает уровень осведомленности сотрудников о потенциальных рисках, но и формирует у них культуру безопасности, способствующую более ответственному отношению к выполнению своих обязанностей. В условиях динамично развивающегося строительного рынка, где технологии и методы работы постоянно совершенствуются, необходимость в регулярном обновлении знаний и навыков становится особенно актуальной.

Своевременное и качественное обучение требованиям охраны труда несомненно важно. Однако современные исследования ВНИИ труда Минтруда России за 2019–2023 гг.³ показывают, что максимальное количество работников погибает в первые полгода после последнего обучения (рис. 1).

Эта статистика свидетельствует о том, что традиционные программы подготовки не всегда обеспечивают необходимую осведомленность работников о реальных рисках на строительных площадках,

¹ Базы данных // Европейский портал информации здравоохранения. URL: <https://gateway.euro.who.int/ru/datasets/>

² Мониторинг условий и охраны труда в Российской Федерации 2018–2023. URL: <https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-uslovij-okhrany-truda>

³ Охрана труда в цифрах // ВНИИ труда Минтруда России. URL: <https://s.vcot.info/document/poleznoe/media/5/66d99c1a16c0e568797996.pdf>

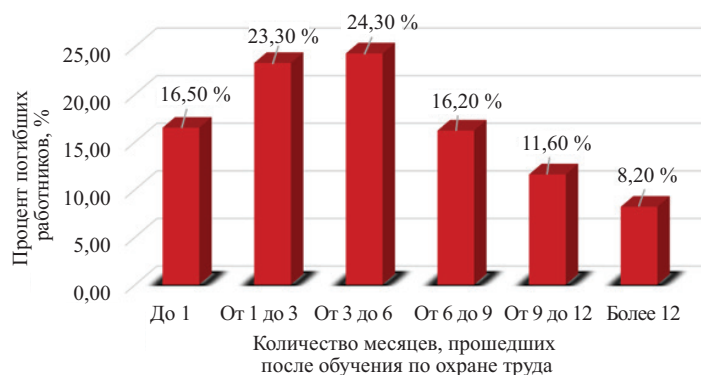


Рис. 1. Зависимость количества погибших от времени, прошедшего после обучения, 2019–2023 гг.

т.е. проводимое работникам обучение недостаточно эффективно, а проверка знаний требований охраны труда нередко проводится формально.

Цель исследования — определение качества существующего обучения безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте на основании анкетирования работников, непосредственно проводящих работы, связанные с высоким риском падения с высоты, а также проверки путем тестирования остаточных знаний указанных работников. Результаты исследования продемонстрируют отношение работников к различным опасностям, которые могут привести к падению с высоты, а также покажут динамику потери знаний по итогам последнего прошедшего обучения безопасным методам и приемам осуществления работ на высоте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для того чтобы оценивать качество существующего обучения работников в области охраны труда следует понимать, какие требования предъявляются к нему в нормативно-правовых актах. Авторами проанализированы имеющиеся требования к обучению безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте и сделан вывод, что регламентируется обучение двумя основными нормативами — Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 № 2464 «О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда»⁴ и приказ Минтруда № 782н, утверждающий Правила по охране труда при работе на высоте⁵.

⁴ О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда : утв. Постановлением Правительства РФ от 24.12.2021 № 2464 (ред. от 12.06.2024) (вместе с Правилами обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405174/

⁵ Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте (п. 132) : утв. Приказом Минтруда России от 16.11.2020 № 782н. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371453/

Исходя из требований Постановления Правительства РФ⁴ п. 36, программа обучения работников, выполняющих работы на высоте, должна включать теоретическую и практическую части. Теоретическая часть при этом может быть дистанционной, но практика обязательно — очной. Есть еще одно требование, касающееся практической части обучения, — практические занятия должны занимать объем не менее 25 % от общих часов программы обучения⁴ п. 49.

Обратимся к требованиям Правил по охране труда при работе на высоте, которые прописывают обязательное проведение практической части обучения безопасным методам и приемам проведения работ на высоте на специально оборудованных стендах или полигонах⁵ п. 17. Также приказ Минтруда № 782н делит всех работников, выполняющих работы на высоте, на три группы по безопасности. Присвоение группы означает допуск к осуществлению определенных видов работ и разграничивает зоны ответственности, т.е. для каждой из трех групп по безопасности Правилами прописаны требования по знаниям и умениям, которые должны быть сформированы у работника определенной группы. На основании требований к знаниям и умениям, прописанным нормативно, обучающими центрами разрабатываются программы обучения для каждой из трех групп с учетом наличия теоретических и практических занятий по соответствующим темам. В результате успешного прохождения обучения на группу работнику выдается удостоверение на право производства работ на высоте, предъявление которого обязательно потребует генеральный подрядчик при заключении акта-допуска с подрядной организацией. Как видно из представленной информации, требования к существующему обучению прописаны недостаточно строго и четко, нет унифицированных программ обучения. Поэтому результативность и качество обучения напрямую зависят от квалифицированности и добросовестности учебного центра, с которым заключается договор на проведение обучения работников. А в случае, когда обучение осуществляется силами работодателя (что также допускается для определенных кате-

горий работников), — от отношения работодателя к важности процесса обучения.

Для оценки эффективности текущего обучения безопасным методам и приемам работы на высоте была создана анкета, состоящая из 30 вопросов. Она направлена на изучение мнения работников о том, насколько опасны различные нарушения норм охраны труда.

Каждый вопрос анкеты касается потенциального опасного фактора, который может привести к травмам в определенных условиях. Участникам исследования предложили оценить степень опасности каждого фактора по 10-балльной шкале, что позволяет установить его влияние на вероятность получения травмы в рабочей среде. Заполняя анкету, респонденты должны были выбрать соответствующую ячейку: 1 балл указывает на минимальное воздействие фактора на риск травмы, 10 баллов обозначает максимальное влияние.

После выявления отношения к конкретным опасностям проведено исследование, посвященное анализу уровня остаточных знаний по результатам последнего прошедшего обучения по охране труда работников, выполняющих работы на высоте. Для этого авторами подготовлено короткое тестирование (15 вопросов) на основании ключевых требований к безопасной организации работ на высоте из нормативно-правовых актов. Тестирование специально разрабатывалось так, чтобы был всего один правильный ответ в каждом вопросе. Оценивались остаточные знания у работников, чье последнее обучение требованиям охраны труда проводилось не более трех месяцев назад. Результаты тестирования обрабатывались в редакторе Microsoft Office Excel, в итоге обработки получены графики, гистограммы, корреляционные зависимости, приведенные далее.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Начало изучения по выявлению отношения работников к различным опасностям было положено в 2023 г. Тогда был проведен первичный анализ 173 анкет, заполненных работниками с высоким риском падения с высоты (работники подрядных организаций на строительных площадках Санкт-Петербурга, выполняющие кровельные, фасадные и монтажные работы) [12, 13]. Анализ показал, что наименее травмоопасными факторами и особенностями организации труда по мнению работников являются:

- допуск к выполнению работ на высоте без обучения по охране труда;
- допуск к выполнению работ на высоте без целевого инструктажа;
- отсутствие или незнание инструкций по охране труда;
- нехватка персонала.

Из полученных данных можно сделать вывод, что работники не находят ценности или увлечения

в классическом обучении, так как оно в основном предоставляет информацию о травмах и летальных исходах чаще всего в виде кратких инструкций по результатам расследований несчастных случаев. Сотрудники воспринимают такую информацию как непрямую и незначимую, считая ее маловероятной для себя: «со мной это никогда не произойдет». В целом отсутствие обучения не является важным аспектом безопасности для работников.

Проведенный корреляционный анализ результатов анкетирования показал важную взаимосвязь, которая прослеживается между различными видами обучения по охране труда. В представленном исследовании установлено, что существует проблема недооценки работниками, выполняющими работы на высоте, вопросов, касающихся обучения в области охраны труда. В дополнение необходимо отметить, что реализуемые обучающими центрами программы зачастую направлены на приобретение исключительно теоретических знаний по охране труда, что несомненно оказывает влияние на оценку данного обучения работниками.

Продолжением данного исследования стала проверка остаточных знаний работников с большим риском падения с высоты по результатам последнего обучения. Цель проверки остаточных знаний работников по результатам прошедшего обучения по охране труда заключается в оценке усвоения ключевых знаний и навыков, необходимых для обеспечения безопасных условий труда. Это позволяет выявить пробелы в понимании работниками требований безопасности и, с другой стороны, в подаче информации преподавателями во время обучения.

По разработанной авторами анкете из 15 вопросов проведено тестирование 38 работников с большим риском падения с высоты, прошедших последнее обучение безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте в январе – марте 2025 г. (рис. 2).

Результаты тестирования работников сведены в таблицу Excel для дальнейшей обработки. В результате анализа получено, что средний балл прохождения тестирования работниками составил 54,7 % правильных ответов (рис. 3, красная линия). Как правило, порогом для успешного прохождения проверки знаний после обучения по охране труда является 80 % правильных ответов. Исходя из этого, на графике указана линия «норма» (рис. 3, коричневая линия) — по уровню 80 %.

Установлено, что остаточные знания работников снизились более чем на 30 % за 3–6 месяцев после последнего обучения по охране труда. Падение остаточных знаний на 30 % в течение нескольких месяцев после обучения по охране труда говорит о необходимости регулярного обновления знаний и практических навыков. Это может свидетельствовать о недостаточной мотивации сотрудников, нехватке практического применения изученного мате-

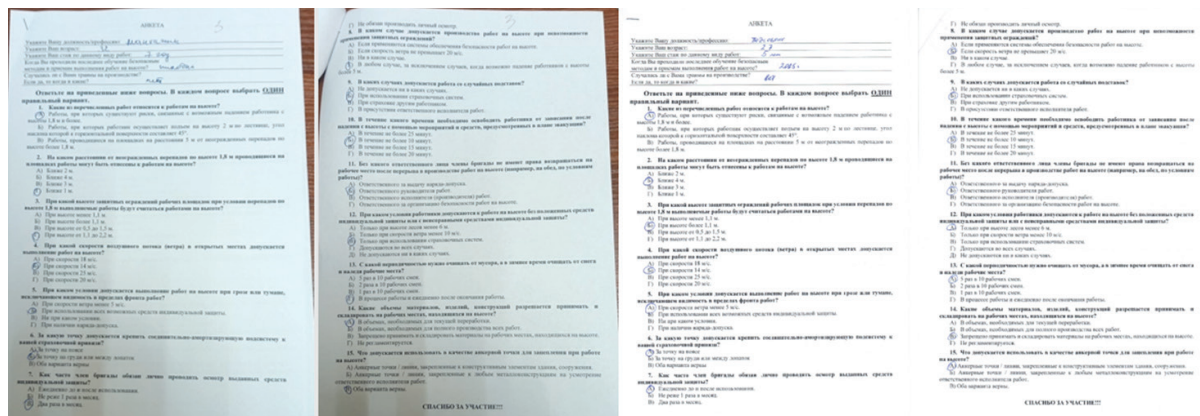


Рис. 2. Заполненные работниками бланки тестирования

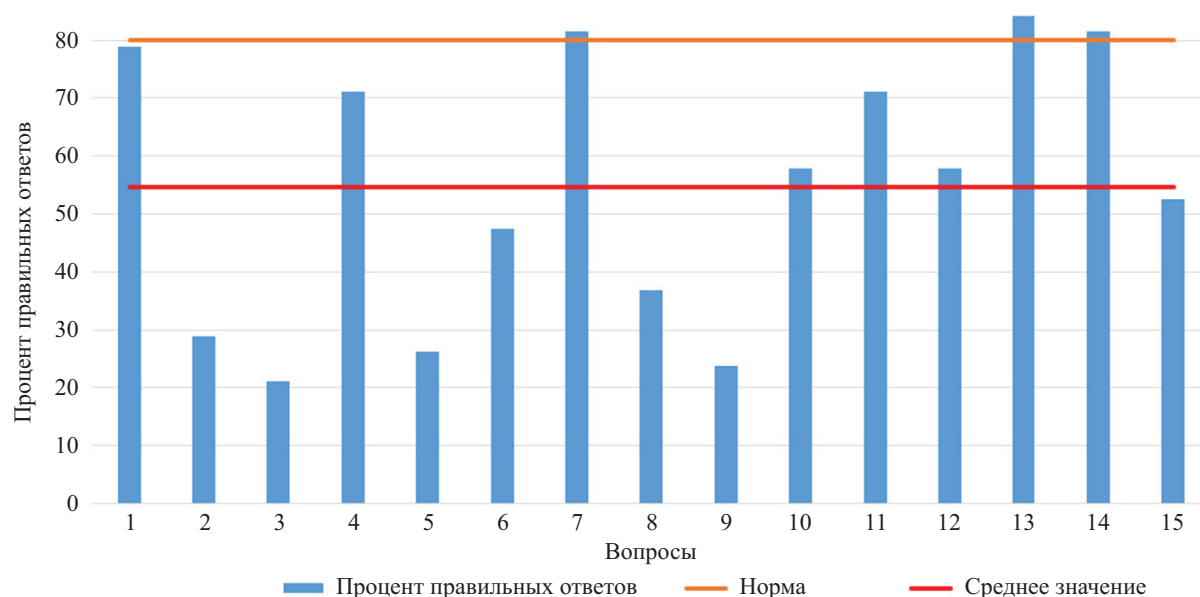


Рис. 3. Диаграмма, отражающая результаты тестирования работников на остаточные знания спустя 3–6 месяцев после последнего обучения безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте

риала или о том, что обучение не было достаточно эффективным.

В результате детального анализа тестирования в части количества правильных ответов на отдельные вопросы было установлено, что наименьший процент правильных ответов имеют вопросы, сведенные в таблицу.

Задумываясь о причинах просадки процента правильных ответов именно по данным вопросам, уместно вспомнить о том, что при выполнении строительных работ у подрядных организаций возникает несколько ключевых приоритетных направлений, которые часто пересекаются и взаимосвязаны. Первое направление — обеспечение безопасности жизни и здоровья работников, минимизация рисков возникновения несчастных случаев и охрана окружающей среды. Второе направление — контроль качества выполняемых работ, который включает соблюдение проектной документации и технических регламентов, использование качественных материа-

лов и оборудования и т.д. Третье направление — это соблюдение сроков, бюджета и договорных обязательств с генеральным подрядчиком.

В современных условиях жесткой конкуренции и стремления к максимизации прибыли подрядные организации часто ставят соблюдение сроков и бюджета выше обеспечения безопасности работников. Это может привести к серьезным последствиям как для работников, так и для компании в целом. Из результатов тестирования можно сделать вывод, что работники показали наименьший средний балл по тем вопросам, которые напрямую связаны с обеспечением личной безопасности. Если провести анализ нарушений, приводящих к падениям с высоты (причины несчастного случая в актах Н-1), учесть мнения людей, имеющих продолжительный опыт профессиональной деятельности в сфере работ на высоте, а также принять во внимание результаты научно-исследовательских выездов авторов данной статьи на строительные площадки Санкт-

Вопросы из тестирования, которые набрали наименьший процент правильных ответов

Номер п/п (как в анкете)	Вопрос	Варианты ответов (правильный ответ выделен курсивом)	Правильные ответы, %
2	На каком расстоянии от неогражденных перепадов по высоте 1,8 м проводящиеся на площадках работы могут быть отнесены к работам на высоте?	А) <i>Ближе 2 м.</i> Б) Ближе 4 м. В) Ближе 3 м. Г) Ближе 1 м	28,9
3	При какой высоте защитных ограждений рабочих площадок при условии перепадов по высоте 1,8 м выполняемые работы будут считаться работами на высоте?	А) <i>При высоте менее 1,1 м.</i> Б) При высоте более 1,1 м. В) При высоте от 0,5 до 1,5 м. Г) При высоте от 1,1 до 2,2 м	21,1
5	При каком условии допускается выполнение работ на высоте при грозе или тумане, исключающем видимость в пределах фронта работ?	А) При скорости ветра менее 5 м/с. Б) При использовании всех возможных средств индивидуальной защиты. В) <i>Ни при каком условии.</i> Г) При наличии наряда-допуска	26,3
6	За какую точку допускается крепить соединительно-амортизирующую подсистему к вашей страховочной привязи?	А) За точку на поясе. Б) <i>За точку на груди или между лопаток.</i> В) Оба варианта верны	47,4
8	В каком случае допускается производство работ на высоте при невозможности применения защитных ограждений?	А) <i>Если применяются системы обеспечения безопасности работ на высоте.</i> Б) Если скорость ветра не превышает 20 м/с. В) Ни в каком случае. Г) В любом случае за исключением случаев, когда возможно падение работников с высоты более 5 м	36,8
9	В каких случаях допускается работа со случайных подставок?	А) <i>Не допускается ни в каких случаях.</i> Б) При использовании страховочных систем. В) При страховке другим работником. Г) В присутствии ответственного исполнителя работ	23,7
15	Что допускается использовать в качестве анкерной точки для зацепления при работе на высоте?	А) Анкерные точки/линии, закрепленные к конструктивным элементам здания, сооружения. Б) Анкерные точки/линии, закрепленные к любым металлоконструкциям на усмотрение ответственного исполнителя работ. В) Оба варианта верны	52,6

Петербурга (подтверждающие, что работники допускают большое количество определенных опасных действий), то можно сделать вывод, что самыми критичными нарушениями, наиболее часто приводящими к падению с высоты, являются:

1. Выбор ненадежной анкерной точки для крепления страховочной системы к конструкции здания (вопрос 15 в тестировании выше). Специалисты подтверждают, что это одна из самых частых причин падений с высоты. Надежная анкерная точка должна обладать достаточной прочностью и устойчивостью, чтобы выдерживать нагрузки в случае падения, что должно подтверждаться расчетами.

Во многих случаях происходит определение надежности и прочности «на глаз», что и приводит к дальнейшим неблагоприятным последствиям.

2. Выбор неверной точки крепления страховочного стропа к привязи (вопрос 6). Зачастую работники используют для крепления точку на поясе, тогда при падении вся нагрузка приходится на пояс работника и происходит перелом позвоночника.

3. Отсутствие страховочной системы в непосредственной близости от перепада по высоте более 2 м или при ограждении высотой менее 1,1 м (вопросы 2 и 3). Также часто встречается ситуация, когда формально ограждение по периметру рабочего

горизонта установлено, но фактически оно не убеждает от падения с высоты, так как не обладает достаточной прочностью и надежностью.

4. Использование монтажного (предохранительного) пояса при выполнении работ с риском падения с высоты (согласно Приказу⁵ запрещено использование предохранительных поясов).

Результаты тестирования подтверждают, что по данным вопросам есть серьезный провал в знаниях. Часто работники не осознают серьезности последствий нарушений требований охраны труда при выполнении работ на высоте, что может привести к трагическим последствиям. Непонимание или недооценка рисков, связанных с безопасностью, делает их более уязвимыми, особенно если учесть, что, как правило, мы не примеряем последствия нарушений на себя («со мной такого никогда не произойдет», «я много раз так делал и ничего не происходило»). По этим причинам работники позволяют установить приоритет осуществления производственных задач над приоритетом обеспечения собственной безопасности. Повышение приоритетности вопросов личной безопасности возможно при помощи изменения подходов к обучению по охране труда, следует уйти от формализма обучения и добавить имитацию последствий нарушений и моделирование несчастного случая в процессе обучения работников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании публикации [14] можно сделать вывод, что в тех строительных организациях, где обучение осуществляется формально, уровень травматизма в первые две недели после завершения обучения превышает показатели более чем в 7 раз по сравнению с теми, где обучение проходит неформально при равных условиях. В условиях высокой динамики работ и требований к выполнению месячных графиков на объекты допускаются сотрудники, не имеющие необходимой квалификации, но формально прошедшие обучение по охране труда [12, 15]. Данные факты подчеркивают проблемы существующего обучения по охране труда работников, выполняющих работы повышенной опасности в строительстве. Для улучшения качества и эффективности обучения стоит обратить внимание на необходимость внедрения более глубоких и практико-ориентированных подходов к обучению, включая регулярные тренинги, симуляции ситуаций и моделирование несчастных случаев.

Модернизация обучения в сфере безопасности должна основываться на комплексном подходе. Требуется, чтобы обучение не только воздействовало на сознание обучающихся, но и учитывало психологические аспекты влияния на них. В своих статьях [16–18] авторы и их коллеги представили читателям полигон «Умный труд», который предлагает инновационные методы обучения сотрудников по вопро-

сам безопасности с учетом психологических факторов. В настоящее время полигон включает девять интерактивных обучающих модулей, каждый из которых посвящен одному из девяти наиболее распространенных видов строительных работ. Каждый модуль состоит из двух частей: первая демонстрирует выполнение конкретного вида работ с соблюдением норм безопасности, вторая иллюстрирует последствия нарушений охраны труда через примеры несчастных случаев. Реалистично представленная на манекене травма в результате смоделированного несчастного случая заставляет работника задуматься о жизни и здоровье и переориентировать приоритет с выполнения производственных задач на обеспечение личной безопасности. Предполагается, что формат обучения, где работник самостоятельно формулирует требования безопасности, анализируя две инсталляции по одному и тому же виду работ, позволяет глубже проникать знаниям и дольше оставаться в памяти у работника.

Для эффективного обучения сотрудников, работающих на высоте, необходима современная материально-техническая база, включающая учебно-тренировочный полигон для отработки практических навыков. В рамках проекта «Современные образовательные технологии для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли» (2022–2026 гг.)^{6, 7} на полигоне «Умный труд» создан учебно-тренировочный полигон «Высота». Таким образом, площадка полигона «Умный труд» дает возможность реализовать комплексный подход к обучению безопасным методам и приемам проведения работ на высоте. Авторы предполагают, что комплексный подход, включающий изучение требований охраны труда на основе модулей с реалистичной инсценировкой несчастных случаев и отработку практических навыков безопасного выполнения работ на учебно-тренировочном полигоне «Высота», позволит лучше усваиваться знаниям и повысит уровень остаточных знаний работников.

На данный момент через обучение на полигоне «Умный труд» прошло достаточное количество работников для проведения дальнейших исследований — определения уровня остаточных знаний через 3–6–9–12 месяцев после обучения. Авторы полагают, что сформированная в рамках обучения на полигоне безопасная поведенческая модель будет

⁶ СПбГАСУ присвоен статус федеральной инновационной площадки. URL: https://www.spbgasu.ru/news-and-events/news/spbgasu_prisvoen_status_federalnoy_innovatsionnoy_ploshchadki-1/

⁷ Об утверждении перечня организаций, отнесенных к федеральным инновационным площадкам, составляющим инновационную инфраструктуру в сфере высшего образования и соответствующего дополнительного профессионального образования, на 2022 год : Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 03.03.2022 № 195.

способствовать долговременному сохранению знаний и навыков безопасного выполнения работ. Это, в свою очередь, приведет к снижению уровня травматизма на строительной площадке. Инвестиции в качественное обучение и практическую отработку безопасных методов работы не только повышают уровень безопасности, но и формируют культуру ответственности за собственную безопасность.

Учебный полигон «Умный труд» уже демонстрирует свою эффективность благодаря уникальным особенностям и способности вызывать определен-

ные эмоции у участников обучения. Разнообразные человеческие реакции на негативно представленные сценарии в обучающих модулях свидетельствуют о значимости подобной среды обучения. Независимо от того является ли реакция положительной или отрицательной, она в любом случае содействует лучшему запоминанию информации. Это подтверждает, что передаваемые знания о потенциальных опасностях останутся в памяти обучающихся дольше и способствуют формированию безопасного поведения на рабочих местах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Арсланбекова Ф.Ф., Пономарев А.Я., Манвелов А.Н. Особенности травматизма в строительстве // Современные концепции развития науки : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 27–29. EDN UBUKGD.
2. Халилов Л.Р., Бекиров Ш.Н. Анализ производственного травматизма в строительстве при выполнении работ на высоте // Bonum Initium. 2020. № 11 (19). С. 145–150. EDN BDEVGT.
3. Графкина М.В., Свиридова Е.Ю., Сафрина Н.А. Анализ производственного травматизма в строительстве // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 80–87. DOI: 10.12737/article_59a93b09cae399.42228254. EDN ZHQZVZ.
4. Жидко Е.А., Шишкина В.А. Производственный травматизм в строительстве // Гражданская оборона и природно-технические системы : сб. ст. по мат. XXI Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 165–170. EDN QVKTHQ.
5. Чипизубов Д.В. Анализ производственного травматизма в строительной отрасли: связь смертельного травматизма с ростом высотного строительства // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2023. № 3. С. 26–31. DOI: 10.61260/2304-0130-2023-3-26-31. EDN PHQUMF.
6. Ларина О.П., Халабуда Е.И. Обеспечение безопасности при выполнении строительно-монтажных работ на высоте // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 4 (31). С. 734–741. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-734-741. EDN DWUPLL.
7. Канина А.Р. Человеческий фактор как основная причина травматизма при высотных работах в строительстве и методы его контроля // Colloquium-Journal. 2021. № 15–1 (102). С. 24–25. EDN MXYNOI.
8. Ланкова Л.А. Травматизм в строительстве: анализ причин падения работников с высоты // Научно-сфера. 2022. № 4–2. С. 225–229. EDN JCXKAK.
9. Othman I., Majid R., Mohamad H., Shafiq N., Napiiah M. Variety of accident causes in construction industry // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 203. P. 02006. DOI: 10.1051/mateconf/201820302006
10. Jasni N.A., Nordin R.M., Ismail Z., Aziz N.A.A. Themes and factors of construction safety management for system dynamic model interactions : a systematic review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 385. Issue 1. P. 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/385/1/012055
11. Ajslev J.Z.N., Sundstrup E., Jakobsen M.D., Kines P., Dyreborg J., Andersen L.L. Is perception of safety climate a relevant predictor for occupational accidents? Prospective cohort study among blue-collar workers // Scandinavian Journal of Work, Environment & Health. 2018. Vol. 44. Issue 4. Pp. 370–376. DOI: 10.5271/sjweh.3723
12. Субботина Н.А. Снижение травматизма на строительной площадке на основе совершенствования модели безопасного поведения работников, выполняющих работы на высоте // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 3 (63). С. 160–166. EDN WQUAMF.
13. Субботина Н.А., Даль Н.Н. Отработка практических навыков в процессе обучения методам и приемам выполнения работ на высоте в строительстве: проблемы и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 260–273. EDN VFUCZT.
14. Агошков А.И., Курочкин П.А., Шилкин Е.А. Повышение безопасности производства работ на высоте совершенствованием обучения по охране труда (на примере строительных организаций) // Аспирант. 2020. № 5 (56). С. 24–28. EDN VCOYLH.
15. Сенченко В.А. Проблемы эффективности обучения требованиям охраны труда на малых предприятиях строительной отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 111–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.03. EDN UNJOLH.
16. Гончарук Т.Н., Субботина Н.А., Нам Г.Е. Полигон «Умный труд» как профессионально-образовательное пространство для формирования личности безопасного типа поведения // XXI век:

итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 4 (56). С. 173–177. DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0035. EDN ODSUTR.

17. Субботина Н.А., Нам Г.Е., Гончарук Т.Н. Методологические подходы к снижению травматизма на строительной площадке по вине человеческого фактора // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 2 (54). С. 210–215. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0041. EDN HYBWM.

18. Никулин А.Н., Субботина Н.А., Гончарук Т.Н. Основные принципы формирования безопасной поведенческой модели работника строительной отрасли // Техносферная безопасность и природообустройство : сб. мат. VII Всеросс. совещания заведующих кафедрами в области безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды и открытого заседания федерального учебно-методического объединения. 2022. С. 252–259. EDN NQURVX.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Андреевна Субботина — старший преподаватель, кафедра техносферной безопасности; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 2070-8620, РИНЦ ID: 958394, Scopus: 57983646500, ORCID: 0000-0002-0557-6725; subbota_91@mail.ru;

Андрей Николаевич Никулин — кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета, заведующий кафедрой техносферной безопасности; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, SPIN-код: 4586-8078, РИНЦ ID: 609617, Scopus: 56149908500, ORCID: 0000-0002-6878-0512; Nikulin.A.N@lan.spbgasu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Injuries in the construction industry remain a pressing issue in modern society. Construction involves high risks that can lead to serious injuries and fatalities. According to data from the World Health Organization and the Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation^{1,2}, construction sites rank among the top places in terms of the number of accidents at work, which highlights the need to implement effective measures to ensure occupational safety. The construction industry is characterized by large volumes of work that must be completed on time. Any construction site involves a list of high-risk tasks that are carried out by multiple teams simultaneously, which is a distinctive feature of this sector of the economy. A large number of publications are devoted to the problem of injuries in construction, which highlights the importance of research [1–4].

Analyzing statistical data² [3] and works [5, 6], it is possible to identify the main type of accident leading to serious and fatal injuries. For many years, falls from height have been the undisputed leader, with the causes of falls often being human factors [7–11].

According to the authors, one of the most effective ways to reduce the level of injuries caused by human error is through systematic training of employees. High-quality training not only raises employees' awareness of potential risks, but also fosters a culture of safety that encourages a more responsible attitude towards their duties. In a rapidly developing construction market, where technologies and working methods are constantly improving, the need for regular updating of knowledge and skills becomes particularly relevant.

Timely and high-quality training in occupational safety requirements is undoubtedly important. However, recent studies by the Russian Ministry of Labour's Research Institute of Labour for 2019–2023³ show that the maximum number of workers die in the first six months after their last training (Fig. 1).

These statistics show that traditional training programmes do not always provide workers with the necessary awareness of the real risks on construction sites, i.e. the training provided to workers is not effective enough, and testing of knowledge of occupational safety requirements is often carried out in a perfunctory manner.

The aim of the study is to determine the quality of existing training in safe methods and techniques for working at height based on a survey of workers directly involved in work associated with a high risk of falling

¹ Databases, European Health Information Portal. URL: <https://gateway.euro.who.int/ru/datasets/>

² Monitoring of working conditions and occupational safety in the Russian Federation 2018–2023. URL: <https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-usloviy-okhrany-truda>

³ Occupational safety in figures, All-Russian Research Institute for Labour of the Ministry of Labour of Russia. URL: <https://s.vcot.info/document/poleznoe/media/5/66d99c1a16c0e568797996.pdf>

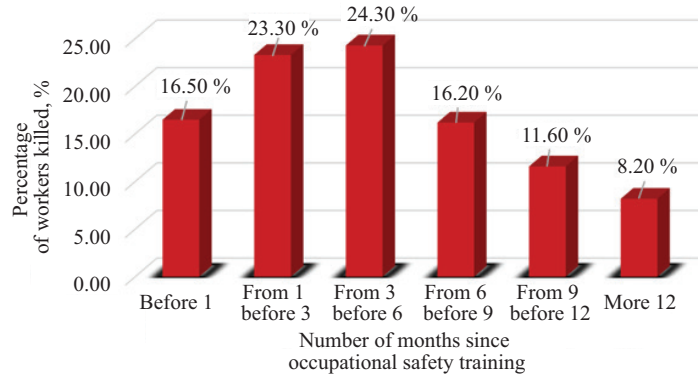


Fig. 1. Dependence of the number of fatalities on the time elapsed after training, 2019–2023

from height, as well as testing the residual knowledge of these workers. The results of the study will demonstrate the attitude of employees to various hazards that can lead to falls from height, as well as show the dynamics of knowledge loss following the last training course on safe methods and techniques for working at height.

MATERIALS AND METHODS

In order to assess the quality of existing occupational safety training for employees, it is necessary to understand the requirements set forth in regulatory and legal acts. The authors analyzed the existing requirements for training in safe methods and techniques for working at height and concluded that training is regulated by two main standards: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2464 of 24 December 2021 “The procedure for occupational health and safety training and testing knowledge of occupational health and safety requirements”⁴ and Order No. 782n of the Ministry of Labour, approving the Rules for occupational safety when working at height⁵.

Based on the requirements of the Resolution of the Government of the Russian Federation⁴ P. 36: The training programme for workers performing work at height must include theoretical and practical components. The theoretical component may be delivered remotely, but the practical component must be delivered in person. There is another requirement concerning the practical component of the training: practical classes must account for at least 25 % of the total hours of the training programme⁴ P. 49.

⁴ The procedure for occupational safety training and testing knowledge of occupational safety requirements: approved by Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2464 dated 24 December 2021 (as amended on 12 June 2024) (together with the Rules for occupational safety training and testing knowledge of occupational safety requirements). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405174/

⁵ The approval of occupational safety rules for working at height (clause 132): approved by Order of the Ministry of Labour of Russia No. 782n dated 16 November 2020. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371453/

Let us turn to the requirements of the Occupational Safety Rules for Working at Height, which stipulate the mandatory practical training in safe methods and techniques for working at height on specially equipped stands or training grounds⁵ P. 17. In addition, Ministry of Labour Order No. 782n divides all workers performing work at height into three safety groups. Assignment to a group means admission to perform certain types of work and delineates areas of responsibility, i.e., for each of the three safety groups, the Rules specify the knowledge and skills requirements that must be developed by an employee of a particular group. Based on the knowledge and skill requirements set out in the regulations, training centres develop training programmes for each of the three groups, taking into account the availability of theoretical and practical classes on relevant topics. Upon successful completion of the training, the employee is issued a certificate for the right to perform work at height, which the general contractor will require when concluding an admission agreement with the contractor. As can be seen from the information presented, the requirements for existing training are not strictly and clearly defined, and there are no unified training programmes. Therefore, the effectiveness and quality of training directly depend on the competence and integrity of the training centre with which the contract for employee training is concluded. And in cases where training is provided by the employer (which is also permitted for certain categories of employees), it depends on the employer’s attitude to the importance of the training process.

To assess the effectiveness of current training in safe methods and techniques for working at height, a questionnaire consisting of 30 questions was created. It is designed to study employees’ opinions on the degree of danger posed by various violations of occupational safety regulations.

Each question in the questionnaire concerns a potential hazard that could lead to injury under certain conditions. Participants in the study were asked to rate the degree of danger of each factor on a 10-point scale, which allows determining its impact on the likelihood of injury in the work environment. When filling out

the questionnaire, respondents had to select the appropriate cell: 1 point indicates the minimum impact of the factor on the risk of injury, 10 points indicates the maximum impact.

After identifying attitudes towards specific hazards, a study was conducted to analyse the level of residual knowledge based on the results of the latest occupational safety training for workers performing work at height. To this end, the authors prepared a short test (15 questions) based on the key requirements for the safe organization of work at height from regulatory and legal acts. The test was specifically designed so that there was only one correct answer for each question. The residual knowledge of employees whose last occupational safety training was no more than three months ago was assessed. The test results were processed in Microsoft Office Excel, resulting in the graphs, histograms, and correlation dependencies shown below.

RESEARCH RESULTS

The study to identify workers’ attitudes towards various hazards began in 2023. At that time, an initial analysis was conducted of 173 questionnaires completed by workers at high risk of falling from heights (contractors working on construction sites in St. Petersburg, performing roofing, facade and installation work) [12, 13]. The analysis showed that, in the opinion of workers, the least injury-prone factors and features of work organization are:

- permission to perform work at height without occupational safety training;
- permission to perform work at height without specific instruction;
- lack of or ignorance of occupational safety instructions;
- staff shortages.

The data obtained suggests that workers do not find value or interest in traditional training, as it mainly provides information about injuries and fatalities, most often in the form of brief instructions based on the results of accident investigations. Employees perceive such information as indirect and insignificant, consider-

ing it unlikely to happen to them: “it will never happen to me”. In general, the lack of training is not an important aspect of safety for employees.

A correlation analysis of the survey results revealed an important relationship between different types of occupational safety training. The study found that workers who perform work at height tend to underestimate the importance of occupational safety training. In addition, it should be noted that the programmes implemented by training centres are often aimed at acquiring exclusively theoretical knowledge of occupational safety, which undoubtedly influences the assessment of this training by employees.

This study was followed by a review of the residual knowledge of employees at high risk of falling from a height based on the results of the latest training. The purpose of testing the residual knowledge of employees based on the results of the previous occupational safety training is to assess the acquisition of key knowledge and skills necessary to ensure safe working conditions. This allows us to identify gaps in employees’ understanding of safety requirements and, on the other hand, in the presentation of information by instructors during training.

Using a questionnaire developed by the authors consisting of 15 questions, 38 employees at high risk of falling from a height who had undergone the latest training in safe methods and techniques for working at height in January-March 2025 were tested (Fig. 2).

The results of the employee testing are compiled in an Excel table for further processing. The analysis shows that the average score for employee testing was 54.7 % correct answers (Fig. 3, red line). As a rule, the threshold for successfully passing the knowledge test after occupational safety training is 80 % correct answers. Based on this, the graph shows a “normal” line (Fig. 3, brown line) at the 80 % level.

It was established that employees’ residual knowledge decreased by more than 30 % within 3–6 months after the last occupational safety training. A 30 % drop in residual knowledge within a few months after occupational safety training indicates the need for regular updating of knowledge and practical skills. This may

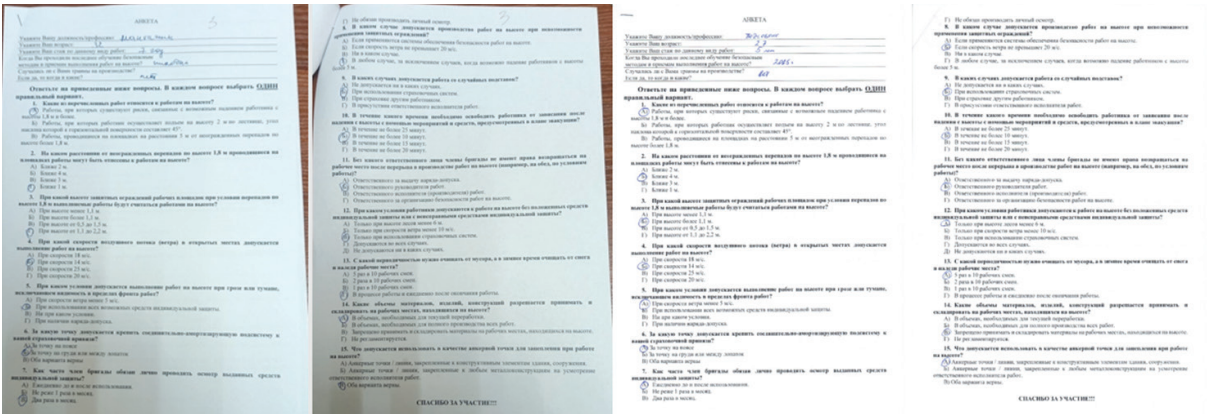


Fig. 2. Test forms completed by employees

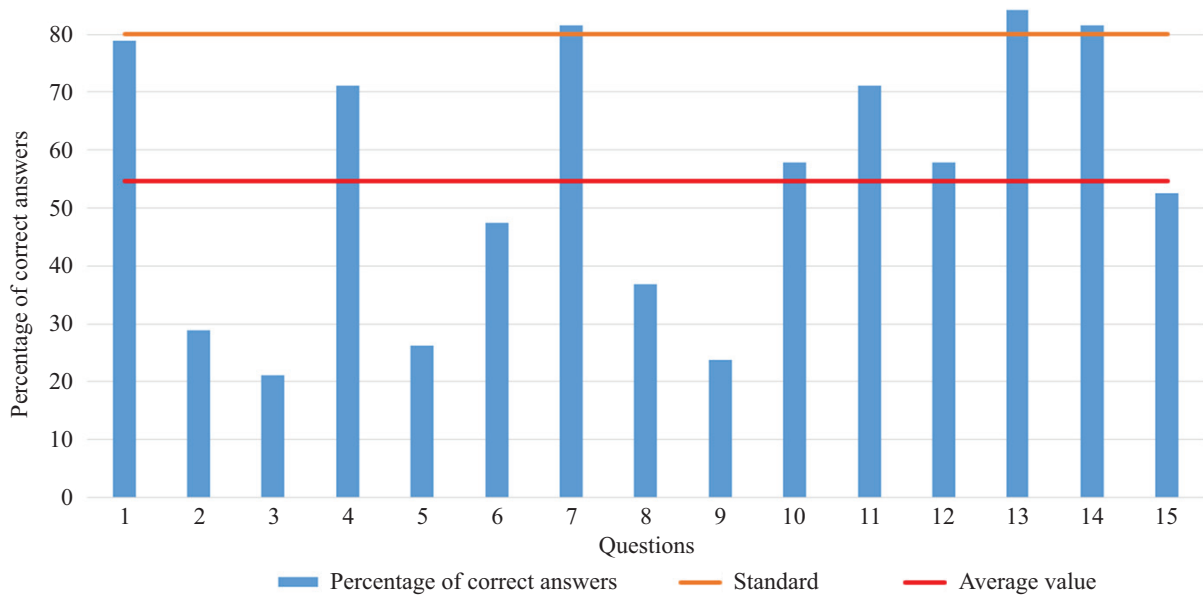


Fig. 3. Diagram showing the results of testing employees on residual knowledge 3–6 months after the last training session on safe methods and techniques for working at height

indicate insufficient motivation among employees, a lack of practical application of the material studied, or that the training was not effective enough.

As a result of a detailed analysis of the test in terms of the number of correct answers to individual questions, it was found that the questions summarized in the Table had the lowest percentage of correct answers.

When considering the reasons for the decline in the percentage of correct answers to these questions, it is worth remembering that when carrying out construc-

tion work, contractors have several key priorities that often overlap and are interrelated. The first priority is ensuring the safety and health of workers, minimizing the risk of accidents and protecting the environment. The second priority is quality control of the work performed, which includes compliance with project documentation and technical regulations, the use of high-quality materials and equipment, etc. The third area is meeting deadlines, budgets, and contractual obligations with the general contractor.

Questions from the test that received the lowest percentage of correct answers

Number (as in the questionnaire)	Question	Answer options (the correct answer is highlighted in <i>italics</i>)	Correct answers, %
2	At what distance from unprotected height differences of 1.8 m can work carried out on platforms be classified as work at height?	A) <i>Closer than 2 m.</i> B) Closer than 4 m. C) Closer than 3 m. D) Closer than 1 m	28.9
3	At what height of protective barriers on work sites, given a height difference of 1.8 m, will the work being performed be considered work at height?	A) <i>At a height of less than 1.1 m.</i> B) At a height of more than 1.1 m. C) At a height of between 0.5 and 1.5 m. D) At a height of between 1.1 and 2.2 m	21.1
5	Under what conditions is it permissible to perform work at height during a thunderstorm or fog that obscures visibility within the work area?	A) When the wind speed is less than 5 m/s. B) When using all possible personal protective equipment. C) <i>Under no circumstances.</i> D) When an access permit is available	26.3
6	At which point is it permissible to attach the connecting and shock-absorbing subsystem to your safety harness?	A) For a point on the belt. B) <i>For a point on the chest or between the shoulder blades.</i> C) Both options are correct	47.4

End of the Table

Number (as in the questionnaire)	Question	Answer options (the correct answer is highlighted in italics)	Correct answers, %
8	In what circumstances is it permissible to carry out work at height when it is not possible to use protective barriers?	A) <i>If safety systems for working at height are in place.</i> B) If the wind speed does not exceed 20 m/s. C) Under no circumstances. D) In any case, except when workers may fall from a height of more than 5 m	36.8
9	In what circumstances is it permissible to work with random stands?	A) <i>Not permitted under any circumstances.</i> B) When using safety systems. C) When secured by another worker. D) In the presence of the person responsible for the work	23.7
15	What can be used as an anchor point for attachment when working at height?	A) Anchor points/lines fixed to structural elements of buildings or structures. B) Anchor points/lines fixed to any metal structures at the discretion of the responsible contractor. C) Both options are correct	52.6

In today’s environment of fierce competition and the pursuit of profit maximization, contractors often prioritize meeting deadlines and budgets over ensuring the safety of workers. This can have serious consequences for both workers and the company as a whole. The test results show that employees scored lowest on questions directly related to personal safety. If we analyse the violations that lead to falls from height (the causes of accidents in H-1 reports), take into account the opinions of people with extensive professional experience in working at height, and also consider the results of the authors’ research trips to construction sites in St. Petersburg (confirming that workers commit a large number of certain dangerous actions), we can conclude that the most critical violations that most often lead to falls from height are:

1. Choosing an unreliable anchor point for attaching the safety system to the building structure (question 15 in the test above). Experts confirm that this is one of the most common causes of falls from height. A reliable anchor point must be sufficiently strong and stable to withstand the load in the event of a fall, which must be confirmed by calculations. In many cases, reliability and strength are determined “by eye”, which leads to further adverse consequences.

2. Choosing the wrong point for attaching the safety sling to the lanyard (question 6). Often, workers use a point on the belt for attachment, so that in the event of a fall, the entire load is transferred to the worker’s belt, resulting in a spinal fracture.

3. Absence of a safety system in the immediate vicinity of a height difference of more than 2 m or with

a guardrail less than 1.1 m high (questions 2 and 3). It is also common for a guardrail to be formally installed around the perimeter of the working area, but in fact it does not protect against falls from height, as it is not sufficiently strong and reliable.

4. Use of a safety harness when performing work with a risk of falling from height (in accordance with Order⁵ the use of seat belts is prohibited).

The test results confirm that there is a serious gap in knowledge on these issues. Employees often do not realize the serious consequences of violating occupational safety requirements when working at height, which can lead to tragic consequences. A lack of understanding or underestimation of safety risks makes them more vulnerable, especially considering that, as a rule, we do not imagine the consequences of violations happening to ourselves (“it will never happen to me”, “I’ve done it many times and nothing has happened”). For these reasons, workers allow the priority of performing production tasks to take precedence over the priority of ensuring their own safety. It is possible to increase the priority of personal safety issues by changing approaches to occupational safety training, moving away from formalistic training and adding simulation of the consequences of violations and accident modelling to the training process for workers.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on publication [14], it can be concluded that in construction organizations where training is formal, the injury rate in the first two weeks after completion of training exceeds the rate by more than seven times

compared to those where training is informal under the same conditions. In conditions of high work dynamics and requirements for the fulfilment of monthly and daily schedules, employees who do not have the necessary qualifications but have formally completed occupational safety training are allowed on site [12, 15]. These facts highlight the problems of existing occupational safety training for workers performing high-risk work in construction. To improve the quality and effectiveness of training, attention should be paid to the need to introduce more in-depth and practice-oriented approaches to training, including regular training sessions, situation simulations and accident modelling.

The modernization of safety training should be based on a comprehensive approach. Training must not only influence the minds of learners, but also take into account the psychological aspects of influencing them. In their articles [16–18], the authors and their colleagues introduced readers to the Smart Work training ground, which offers innovative methods for training employees on safety issues, taking psychological factors into account. Currently, the training ground includes nine interactive training modules, each of which is dedicated to one of the nine most common types of construction work. Each module consists of two parts: the first demonstrates the performance of a specific type of work in compliance with safety standards, while the second illustrates the consequences of occupational safety violations through examples of accidents. The realistic representation of an injury on a mannequin as a result of a simulated accident makes workers think about life and health and shift their priority from performing production tasks to ensuring personal safety. It is assumed that the training format, where the employee independently formulates safety requirements by analyzing two installations for the same type of work, allows for deeper knowledge penetration and longer retention in the employee's memory.

Effective training of employees working at height requires modern material and technical resources, including a training ground for practicing practical skills. As part of the project “Modern educational technologies for ensuring occupational safety in the construction industry” (2022–

2026)^{6, 7} the Smart Labour training ground has created the Height training ground. Thus, the Smart Labour training ground provides an opportunity to implement a comprehensive approach to teaching safe methods and techniques for working at height. The authors suggest that a comprehensive approach, including the study of occupational safety requirements based on modules with realistic accident simulations and the development of practical skills for safe work at the Vysota training ground, will improve knowledge retention and increase the level of residual knowledge among workers.

At present, a sufficient number of employees have undergone training at the Smart Labour training ground to conduct further research — determining the level of residual knowledge 3–6–9–12 months after training. The authors believe that the safe behavioural model formed during training at the training ground will contribute to the long-term retention of knowledge and skills for safe work performance. This, in turn, will lead to a reduction in the level of injuries on the construction site. Investing in high-quality training and practical practice of safe working methods not only increases safety levels, but also fosters a culture of responsibility for one's own safety.

The Smart Work training ground is already proving its effectiveness thanks to its unique features and ability to evoke certain emotions in training participants. The variety of human reactions to the negative scenarios presented in the training modules demonstrates the importance of this type of training environment. Regardless of whether the reaction is positive or negative, it in any case contributes to better memorization of information. This confirms that the knowledge conveyed about potential hazards will remain in the memory of trainees for longer and contribute to the formation of safe behaviour in the workplace.

⁶ SPbGASU has been granted the status of a federal innovation platform. URL: https://www.spbgasu.ru/news-and-events/news/spbgasu_prisvoen_status_federalnoy_innovatsionnoy_ploshchadki-1/

⁷ The approval of the list of organizations classified as federal innovation platforms, constituting the innovation infrastructure in the field of higher education and relevant additional professional education, for 2022: Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 195 dated 3 March 2022.

REFERENCES

1. Arslanbekova F.F., Ponomarev A.Y., Manvelov A.N. Features of Trauma in Construction. *Modern Concepts of Science Development : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2015; 27-29. EDN UBUKGD. (rus.).
2. Khalilov L.R., Bekirov Sh.N. Analysis of industrial injuries in construction when executing works

at height. *Bonum Initium*. 2020; 11(19):145-150. EDN BDEVGT. (rus.).

3. Grafkina M.V., Sviridova E.Yu., Safrina N.A. Analysis of Occupational Injuries in Construction. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017; 9:80-87. DOI: 10.12737/article_59a93b09cae399.42228254. EDN ZHQZVZ. (rus.).

4. Zhidko E.A., Shishkina V.A. Occupational injuries in construction. *Civil Defense and Natural-Technical Systems : Collection of Articles from the XXI International Scientific and Practical Conference*. 2025; 165-170. EDN QVKTHQ. (rus.).

5. Chipizubov D. Analysis of occupational injuries in the construction industry: the relationship of fatal injuries with the growth of high-rise construction. *Monitoring and Expertise in Safety Engineering*. 2023; 3:26-31. DOI: 10.61260/2304-0130-2023-3-26-31. EDN PHQUMF. (rus.).

6. Larina O.P., Khalabuda E.I. Accident prevention during construction and installation works at height. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019; 9(4):(31):734-741. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-734-741. EDN DWUPLL. (rus.).

7. Kanina A.R. The human factor as the main cause of injuries during high-rise work in construction and methods of its control. *Colloquium-Journal*. 2021; 15-1(102):24-25. EDN MXYNOI. (rus.).

8. Lankova L.A. Injuries in construction: analysis of the causes of workers falling from a height. *Nauko-sfera*. 2022; 4-2:225-229. EDN JCXKAK. (rus.).

9. Othman I., Majid R., Mohamad H., Shafiq N., Napiiah M. Variety of accident causes in construction industry. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 203:02006. DOI: 10.1051/mateconf/201820302006

10. Jasni N.A., Nordin R.M., Ismail Z., Aziz N.A.A. Themes and factors of construction safety management for system dynamic model interactions : a systematic review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 385(1):012055. DOI: 10.1088/1755-1315/385/1/012055

11. Ajslev J.Z.N., Sundstrup E., Jakobsen M.D., Kines P., Dyreborg J., Andersen L.L. Is perception of safety climate a relevant predictor for occupational accidents? Prospective cohort study among blue-collar workers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2018; 44(4):370-376. DOI: 10.5271/sjweh.3723

12. Subbotina N.A. Reducing injuries at the construction site on the basis of improving the model of safe

behavior of workers performing work at height. *21 century: Results of the Past and Problems of the Present plus*. 2023; 12(3):(63):160-166. EDN WQUAMF. (rus.).

13. Subbotina N.A., Dal N.N. Developing practical skills in the process of training methods and techniques of performing work at height in construction: problems and prospects. *Izvestiya Tula State University*. 2023; 4:260-273. EDN VFUCZT. (rus.).

14. Agoshkov A.I., Kurichkin P.A., Shilkin E.A. An enhance of work at height safety by comprehensive professional safety education programs. *Aspirant*. 2020; 5(56):24-28. EDN VCOYLH. (rus.).

15. Senchenko V.A. Learning efficiency problems to requirements of labor protection at small enterprises of construction branch. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. *Construction and Architecture*. 2015; 3:111-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.03. EDN UNJOLH. (rus.).

16. Goncharuk T.N., Subbotina N.A., Nam G.E. Polygon "Smart Labor" as a professional and educational space for the formation of a safe type of behavior personality. *21 century: Results of the Past and Problems of the Present plus*. 2021; 10(4):(56):173-177. DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0035. EDN ODSUTR. (rus.).

17. Subbotina N.A., Nam G.E., Goncharuk T.N. *Methodological approaches to reduce injuries on construction site due to the human factor. 21 century: Results of the Past and Problems of the Present plus*. 2021; 10(2):(54):210-215. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0041. EDN HYBWMM. (rus.).

18. Nikulin A.N., Subbotina N.A., Goncharuk T.N. Basic Principles for Forming a Safe Behavioral Model for Workers in the Construction Industry. *Technosphere Safety and Environmental Management : Collection of Materials from the VII All-Russian Conference of Heads of Departments in the Field of Life Safety and Environmental Protection and Open Meeting of the Federal Educational and Methodological Association*. 2022; 252-259. EDN NQURVX. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

BIONOTES: Nadezhda A. Subbotina — senior lecturer, Department of Technosphere Safety; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 2070-8620, ID RSCI: 958394, Scopus: 57983646500, ORCID: 0000-0002-0557-6725; subbota_91@mail.ru;

Andrey N. Nikulin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Civil Engineering, Head of the Department of Technosphere Safety; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 4586-8078, ID RSCI: 609617, Scopus: 56149908500, ORCID: 0000-0002-6878-0512; Nikulin.A.N@lan.spb-gasu.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.332.4

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при адгезии материалов для 3D-печати

Илья Омарович Раббаа, Оксана Александровна Ларсен

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В технологии строительной 3D-печати при больших объемах бетонирования требуется обеспечение технологических перерывов и разделение объекта на захватки, при этом растворная смесь должна успевать обрести несущую способность материала при наращивании высоты вертикальных элементов. Особенностью ведения работ с применением этой технологии строительства являются проблемы образования «холодных» швов, связанные с обеспечением прочности сцепления граничащих слоев при одновременном регулировании требуемых реологических и технологических показателей материалов для 3D-печати. Большинство исследований затрагивает работу цементных систем по сравнению с гипсовыми в связи со сложностями регулирования сроков схватывания и водостойкости камня. Активные минеральные добавки используются для регулирования реологических свойств растворной смеси. Органические добавки могут повышать прочность сцепления и адгезию, но требуют совместимости с другими группами добавок. Для этого необходимо изучение влияния органической модифицирующей добавки и гидрофобизатора на адгезионную прочность с бетонным основанием.

Материалы и методы. Приготовление растворной смеси и водного раствора органической полифункциональной добавки проводилось по установленному режиму с учетом полного диспергирования модифицирующего компонента в воде при последующем изготовлении и хранении образцов испытаний в соответствии с методикой, регламентированной нормативными документами.

Результаты. Результаты испытания показывают на снижение адгезии материала к бетону при добавлении модификатора вязкости и совместном использовании с гидрофобизатором, поскольку при взаимодействии на границе раздела растворной смеси с бетоном не обеспечивается протекание процессов образования физико-химической связи. Также при введении гидрофобного компонента в состав растворной смеси наблюдается пластифицирующее действие с увеличением проникающей способности во внутренние слои бетона, на что указывают изменения преимущественно когезионного характера разрушения образцов на адгезионный при появлении участков с видом отрыва по материалу основания.

Выводы. Обоснована и подтверждена актуальность обеспечения совместимости органического модификатора и гидрофобизатора для адгезионной прочности материала в аддитивном строительном производстве. Актуальность темы дальнейшей работы заключается в установлении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки с целью обеспечения высоких значений адгезионной прочности и проникающей способности растворной смеси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, материалы для АСП, аддитивные технологии, органическая полифункциональная добавка, гидрофобизатор, прочность сцепления с основанием, композиционное гипсовое вяжущее, межслойная адгезия

Благодарности. Исследование выполнено на оборудовании, предоставленном Научно-исследовательским институтом строительных материалов и технологий НИУ МГСУ (URL: <https://nii-smit.ru/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Раббаа И.О., Ларсен О.А. Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при адгезии материалов для 3D-печати // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Автор, ответственный за переписку: Илья Омарович Раббаа, ilya_rabbaa@mail.ru.

Compatibility of viscosity modifiers and water repellent on adhesion of 3D printing materials

Ilya O. Rabbaa, Oksana A. Larsen

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

ABSTRACT

Introduction. In the technology of construction 3D printing, with large volumes of concreting, it is necessary to ensure technological breaks and divide the object into sections, while the mortar mixture must have time to acquire the bearing capacity of the material when increasing the height of vertical elements. The peculiarity of conducting work using this construction technology results in problems of forming "cold" joints associated with ensuring the strength of the adhesion of adjacent layers while simultaneously regulating the required rheological and technological parameters of materials for 3D printing. Most studies concern the operation of cement systems in comparison with gypsum systems due to the difficulties in regulating the setting time and water resistance of the stone. Active mineral additives are used to regulate the rheological properties of the mortar mixture. Organic additives can increase the strength of adhesion and adhesion, but require compatibility with other groups of additives. This requires studying the effect of an organic modifying additive and a water repellent on the adhesive strength with a concrete base.

Materials and methods. The preparation of the solution mixture and the aqueous solution of the organic polyfunctional additive was carried out according to the established mode, taking into account the complete dispersion of the modifying component in water during the subsequent production and storage of test specimens in accordance with the methodology regulated by regulatory documents.

Results. The test results indicate a decrease in the adhesion of the material to concrete when adding a viscosity modifier when used together with a water repellent, since the interaction at the interface of the mortar mixture with concrete does not ensure the formation of a physical and chemical bond. Also, when introducing a hydrophobic component into the composition of the mortar mixture, a plasticizing effect is observed with an increase in penetrating ability into the inner layers of concrete, which is indicated by changes in the predominantly cohesive nature of the destruction of specimens to adhesive with the appearance of areas with a type of tearing along the base material.

Conclusions. The relevance of ensuring the compatibility of an organic modifier and a water repellent to ensure the adhesive strength of the material in additive construction production is substantiated and confirmed. The relevance of the topic of further work lies in establishing a rational ratio of a water repellent and an organic additive to ensure high values of adhesive strength and penetrating ability of the mortar mixture.

KEYWORDS: construction, materials for ACP, additive technologies, organic multifunctional additive, hydrophobisator, adhesion strength to the base, composite gypsum binder, interlayer adhesion

Acknowledgements. The study was carried out using equipment provided by the Research Institute of Building Materials and Technologies of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). (URL: <https://nii-smi.ru/>).

FOR CITATION: Rabbaa I.O., Larsen O.A. Compatibility of viscosity modifiers and water repellent on adhesion of 3D printing materials. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Corresponding author: Ilya O. Rabbaa, ilya_rabbaa@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Технология возведения строительных объектов с применением строительной трехмерной печати подразумевает наличие технологических перерывов в работе оборудования и разделение объекта на технологические захватки. По прошествии времени нанесенная растворная смесь успевает приобрести кристаллизационную структуру с набором прочности для обеспечения несущей способности материала [1–3], на который начинают оказывать воздействие нарастающие слои укладки, после чего затвердевший цементный камень следует рассматривать в качестве основания под нанесение материала для аддитивного строительного производства (АСП), поскольку возникает риск возникновения холодных швов [4, 5].

У материалов для АСП, применяемых на строительном рынке, существуют не решенные в полной мере трудности в обеспечении прочности сцепления затвердевшего цементного камня граничащих слоев в связи с технологическими принципами при экструдировании растворной смеси через сопло 3D-принтера, а также адгезии к поверхности нанесения, выражаемые бесшовным переходом при увеличении уровня возведения вертикальной конструкции, в результате чего требуется проведение мероприятий по обеспечению однородности характеристик сцепления материала строительного

объекта с целью соответствия принципам монолитности. Озвученная проблема в современном способе ведения строительства затрагивается в научных работах [6, 7], для решения которых предлагается регулировка рецептуры состава для строительной 3D-печати путем обеспечения сохранности технологических показателей во времени при одновременном придании нанесенному материалу несущей способности с использованием активных минеральных добавок (МД) в качестве модификаторов реологических свойств растворной смеси.

Большинство исследовательских работ по изучению реологических и технологических показателей материалов для строительной 3D-печати затрагивает смеси, приготовленные на цементном вяжущем по сравнению с гипсовым и его композитными аналогами [8], поскольку подобный выбор сырья обусловлен простотой гарантии сохранности технологических свойств растворной смеси в соответствии с установленным режимом и требуемой скоростью возведения, а также отсутствием возможности получения композиционного вяжущего с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками с применением вяжущего низкой марки. К наиболее значимым проблемам использования гипсового сырья при разработке рецептуры материала для АСП относится обеспечение легкости регулирования сроков схватывания и стойкости

к воздействию воды гипсового камня, выражаемое коэффициентом его размягчения.

Для требуемых показателей материалов на многокомпонентном гипсовом вяжущем для аддитивных строительных технологий предлагается применение активных МД, участвующих в регулировании реологических и технологических свойств растворной смеси и обеспечивающих гидравлическую активность применяемого вяжущего [9]. В некоторых научных трудах авторов, посвященных изучению реологических свойств растворной смеси с помощью МД, было установлено, что их эффективность действия в качестве модификаторов вязкости системы возможна при значительных расходах по массе вяжущего [10–12]. По этой причине в качестве эффективных добавок, модифицирующих реологические свойства растворной смеси, используют материалы органического происхождения, которые также могут повышать прочность сцепления граничащих слоев материала и к основанию нанесения, однако при этом следует руководствоваться их совместимостью с другими применяемыми добавками в составе смеси, поскольку препятствие действию одного из компонентов механизму работы другого ведет к снижению эффективности работы состава, затрудняя при этом подбор рецептуры [13–15].

В целях настоящей работы поставлена задача изучения влияния органической модифицирующей добавки полифункционального назначения на адгезионную прочность с бетонным основанием. Кроме того, важно учитывать его совместимость с гидрофобизаторами при подборе оптимального соотношения в составе на композиционном гипсовом вяжущем для повышения водостойкости затвердевшего камня, поскольку отсутствие соблюдения этого условия может привести к снижению эффекта отталкивания и, как следствие, к увеличению водопоглощения материала, а также снижению адгезионной прочности материала за счет нейтрализации действия макромолекул модификатора по образованию полимерной связи с основанием нанесения и других эксплуатационных характеристик [16, 17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья, применяемого для исследовательской работы и удовлетворяющего требованию нормативного документа на материалы для аддитивного строительного производства, использованы следующие компоненты:

1) гипсовое вяжущее высокопрочное марки Г-16 Б II (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат») в соответствии с ГОСТ 125–2018;

2) гипсовое вяжущее строительное марки Г-5 Б II (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат») в соответствии с ГОСТ 125–2018;

3) портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (АО «Белгородский цемент») в соответствии с ГОСТ 31108–2020;

4) зола-уноса (ООО «ЭКО-Золопродукт») в соответствии с ТУ 5712-003-84800065–2010;

5) мелкий пористый заполнитель, полученный из отсева дробления некондиционной фракции пеностеклянного щебня фракции с размером зерен 0,63–0,16 мм;

6) порошкообразный суперпластификатор Sika ViscoCrete-226 P на основе эфиров поликарбоксилатов;

7) гидрофобизирующая добавка: порошковый олеат натрия с содержанием вещества не менее 95 %;

8) органическая полифункциональная добавка, выполняющая функцию модификатора вязкости с внутренним шифром VM-XG;

9) водопроводная вода питьевая в соответствии с ГОСТ 23732–2011.

Расходы компонентов для получения материала исследования были приняты на основании ранее разработанного состава, применяемого при изучении реологических свойств и технологических показателей растворной смеси с модифицирующим компонентом. Количество гидрофобизатора для приготовления материала принято 0,3 % от массы сухой смеси. Определение прочности сцепления раствора с бетонным основанием выполнили по методике ГОСТ Р 58276–2018. Приготовление растворной смеси с целью изготовления образцов испытаний проводили по следующему режиму: перемешивание компонентов в течение 120 с, затем остановка смесителя на 90 с для снятия налипшей растворной смеси на лопасть и смесительную чашу, далее осуществляли повторное перемешивание в течение 60 с для обеспечения суммарного времени перемешивания, равного 3 мин.

Затворение сухой смеси производили с помощью 8%-ного водного раствора органической полифункциональной добавки. Для обеспечения полного протекания процесса диспергирования модифицирующего компонента в объеме жидкой фазы проводили периодическое перемешивание набухающего модификатора с помощью дрели с лопастной насадкой с частотой вращения не более 450 об/мин. С целью устранения влияния непрогидратировавшихся частиц органической полифункциональной добавки на образование дефектов в затвердевшем гипсовом камне использовали приготовленный гель в качестве затворителя сухой смеси не ранее чем через 90 мин от момента начала приготовления раствора модификатора вязкости.

Нанесение приготовленной растворной смеси на поверхность бетонной плиты-основания, изготовленной в соответствии с требованием ГОСТ Р 58277–2018, выполнили с помощью шпателя с шириной лезвия 10 мм в один прием с прижатием смеси и выравниванием лицевой поверхности образцов стальной линейкой. Для изготовления образцов длиной ребра 50 мм использовался силиконовый аппликатор, обеспечивающий толщину нанесения слоя растворной смеси 5 мм. Снятие аппликатора

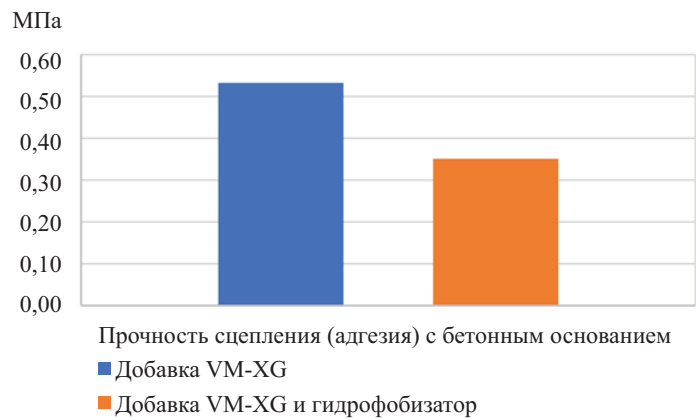


Рис. 1. Влияние органической полифункциональной добавки и гидрофобизатора на адгезию материала для АСП

с плиты основания осуществлялось при руководстве сохраняемостью свойств растворной смеси, предварительно проводилось подрезание внешней грани вдоль отверстий аппликатора при помощи лезвия для предотвращения возможности нарушения целостности изготовленных образцов.

Хранение плиты-основания с образцами испытания осуществлялось в течение 7 сут в помещении, обеспечивающем поддержание температуры и относительной влажности воздуха $t = (22 \pm 2)^\circ\text{C}$ и $\varphi = (52 \pm 10) \%$ соответственно. По прошествии времени хранения плиты к затвердевшим образцам приклеи-



Рис. 2. Внешний вид образцов для определения прочности сцепления (адгезии) материала для АСП с бетонным основанием: *a* — перед приклеиванием штампов; *b* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой; *c* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой и гидрофобизатором

вались стальные штампы квадратного сечения (размер граней 50 мм) с помощью двухкомпонентного клея на основе эпоксидной смолы. Перед наклеиванием штампов проводилось выравнивание поверхности материала испытания путем затирки образцов с использованием шлифовальной бумаги с последующим обеспыливанием поверхности. Испытание на адгезионный отрыв образцов от бетонной плиты осуществлялось по истечении 24 ч от момента приклеивания штампов с помощью портативной испытательной машины для измерений усилия отрыва (адгезии) HP 1000 Haftprüfsystem с применением гидравлического силового цилиндра с максимальным измеряемым усилием отрыва 9 кН при скорости нарастания нагрузки 250 ± 50 Н/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам исследования материала для АСП с применением органической полифункциональной добавки было установлено ее влияние на прочность сцепления с бетонным основанием и совместимость с гидрофобизатором в составе затвердевшего раствора (рис. 1).

Из полученных значений прочности сцепления серии образцов можно наблюдать снижение адгезии материала к бетонному основанию с 0,53 до 0,35 МПа при добавлении гидрофобизирующей добавки совместно с модификатором в состав сухой смеси. Подобное проявление подтверждается механизмом действия гидрофобных компонентов, механизм действия которых заключается в протекании химических процессов на границе раздела поверхности затвердевающего раствора и основания, а также внутри микродефектов бетона с образованием пленок, препятствующих дальнейшему капиллярному подсосу воды из растворной смеси, которое необходимо для образование физико-химической связи с бетоном [18, 19].

В ходе визуальной оценки характера отрыва (рис. 2) определено, что образцы состава затвердевшего камня при применении органической полифункциональной добавки обеспечивают 55,2 % когезионного разрушения и 44,8 % адгезионного разрушения в серии образцов испытания. В то же

время серия образцов, изготовленных при совместном использовании модифицирующего компонента и гидрофобизатора, обладает долей поверхности испытанного раствора с разрушением материала основания, равным 25,3 %.

Подобное изменение характера отрыва от бетонной поверхности при содержании гидрофобизатора в растворной смеси может быть объяснено предположением, что многие виды добавок из этой группы обладают пластифицирующим эффектом, при котором увеличивается проникающая способность растворной смеси с заполнением микродефектов и капиллярных пор бетонного основания [20, 21]. Такое предположение также подтверждается улучшением удобоукладываемости растворной смеси и легкости ее перемешивания в чаше смесителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснована возможность совместного использования органического модификатора реологических свойств и гидрофобизатора с целью обеспечения адгезионной прочности растворной смеси для 3D-печати на композиционном гипсовом вяжущем с оптимальным соотношением компонентов для межслойной адгезии.

Установлено, что введение гидрофобизатора совместно с модифицирующей добавкой способствует снижению адгезионной прочности к бетону. Применение объемной гидрофобизации приводит к снижению прочности сцепления на 34,2 %. Изучение характера отрыва затвердевшего раствора к бетонному основанию свидетельствует об увеличении проникающей способности растворной смеси, что объясняется положительным влиянием гидрофобизатора на улучшение консистенции растворной смеси, обеспечение связности системы.

Актуальность темы будущих исследований заключается в определении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки полифункционального назначения для обеспечения высоких значений адгезионной прочности затвердевшего материала и проникающей способности растворной составляющей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иноземцев А.С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX.
2. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 127–134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB.

3. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 14–22.
4. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
5. Гончарова Ю.Ю., Дроботов А.В., Торубаров И.С., Волохов М.А. Исследование адгезионных свойств поверхностей для 3D-печати // Cifra.

Машиностроение. 2024. № 2 (3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM.

6. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 174–180. EDN WHAIQB.

7. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

8. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1037. Pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26

9. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д. Влияние модифицирующей добавки с гидрофобизирующим эффектом на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR.

10. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.

11. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3d-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2019. Т. 11. № 3. С. 325–334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG.

12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Pp. 59–65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9

13. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 34–40.

DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV.

14. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Котова К.С., Шведова М.А., Юров П.Ю. Исследования факторов регулирования прочности адгезионного соединения «цементная матрица — армирующее волокно» в композитах для строительной 3D-печати // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 2. С. 124–133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN HIGENO.

15. Wang Y., Qiu L., Chen S., Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. P. 134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403

16. Строганов В.Ф., Амелеченко М.О., Мухаметрахимов Р.Х., Вдовин Е.А., Табаева Р.К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем — шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL.

17. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Issue 6. DOI: 10.14359/51733105

18. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.

19. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics // Applied Surface Science. 2018. Vol. 450. Pp. 492–501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204

20. Bildyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58. Issue 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1134/s0965544118040035

21. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — a First Feasibility Study // RILEM Bookseries. 2020. Pp. 978–987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Илья Омарович Раббаа — инженер Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий, аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ilya_rabbaa@mail;

Оксана Александровна Ларсен — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; LarsenOA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Раббаа И.О. — концепция исследования, сбор материала, изготовление образцов, проведение испытаний, обработка результатов, написание исходного текста, формулирование выводов.

Ларсен О.А. — научное руководство, концепция исследования, научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The technology of constructing buildings using three-dimensional printing involves technological breaks in the operation of equipment and the division of the object into technological sections. Over time, the applied mortar mixture acquires a crystalline structure with a set of strengths to ensure the load-bearing capacity of the material [1–3], which begins to be affected by the growing layers of the structure. After that, the hardened cement stone should be considered as a base for the application of material for additive construction production (ACP), as there is a risk of cold joints [4, 5].

Materials for ACP used in the construction market have unresolved difficulties in ensuring the strength of the bond between the hardened cement stone and the adjacent layers due to the technological principles of extruding the mortar mixture through the nozzle of a 3D printer, as well as adhesion to the application surface, expressed by a seamless transition as the level of vertical construction increases, as a result of which measures are required to ensure the uniformity of the adhesion characteristics of the construction material in order to comply with the principles of monolith city. The problem raised in the modern method of construction is addressed in scientific works [6, 7], which propose adjusting the composition of the mixture for 3D construction printing by ensuring the stability of technological indicators over time while simultaneously imparting load-bearing capacity to the applied material using active mineral additives (MA) as modifiers of the rheological properties of the mortar mixture.

Most research studies on the rheological and technological indicators of materials for 3D construction printing concern mixtures prepared with cementitious binders rather than gypsum and its composite analogues [8], since this choice of raw materials is due to the ease of ensuring the preservation of the technological properties of the mortar mixture in accordance with the established regime and the required speed of construction, as well as the inability to obtain a composite binder with high technical and operational characteristics using a low-grade binder. One of the most significant problems in the use of gypsum raw materials in the development of a material formulation for ACP is ensuring the ease of controlling the setting time and water resistance of gypsum stone, expressed by its softening coefficient.

To achieve the required performance of materials based on multicomponent gypsum binders for additive construction technologies, it is proposed to use active MA that participate in regulating the rheological and technological properties of the mortar mix-

ture and ensure the hydraulic activity of the binder used [9]. In some scientific works by authors devoted to the study of the rheological properties of mortar mixtures using MA, it was established that their effectiveness as viscosity modifiers of the system is possible at significant costs in terms of binder mass [10–12]. For this reason, materials of organic origin are used as effective additives that modify the rheological properties of mortar mixtures, which can also increase the adhesion strength of the boundary layers of the material to the application base. However, their compatibility with other additives used in the mixture should be taken into account, since the interference of one component with the mechanism of action of other leads to a decrease in the effectiveness of the composition, making it difficult to select the right formulation [13–15].

The aim of this work is to study the effect of a multifunctional organic modifying additive on the adhesive strength with a concrete base. In addition, it is important to consider its compatibility with water repellents when selecting the optimal ratio in the composition of a composite gypsum binder to increase the water resistance of the hardened stone, since failure to comply with this condition may lead to a decrease in the repellent effect and, as a result, an increase in the water absorption of the material, as well as a decrease in the adhesive strength of the material due to the neutralization of the action of the macromolecules of the modifier in the formation of a polymer bond with the application base and other performance characteristics [16, 17].

MATERIALS AND METHODS

The following components were used as raw materials for the research work, which meet the requirements of the regulatory document on materials for additive construction production:

- 1) high-strength gypsum binder grade G-16 B II (“Samara Gypsum Plant” CJSC) in accordance with GOST 125–2018;
- 2) gypsum binder for construction, grade G-5 B II (“Samara Gypsum Plant” CJSC) in accordance with GOST 125–2018;
- 3) Portland cement CEM I 42.5N (“Belogorodsky Cement” JSC) in accordance with GOST 31108–2020;
- 4) fly ash (“ECO-Zoloproduct” LLC) in accordance with TU 5712-003-84800065–2010;
- 5) fine porous filler obtained from the screening of crushed substandard foam glass aggregate with a grain size of 0.63–0.16 mm;

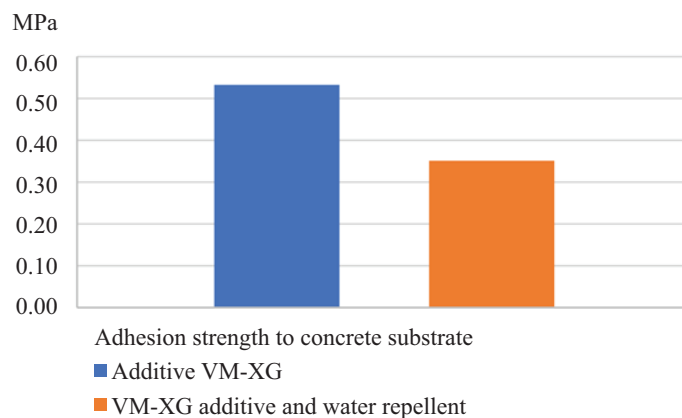


Fig. 1. Effect of organic multifunctional additive and water repellent on the adhesion of material for ACP

6) Sika ViscoCrete-226 P powder superplasticizer based on polycarboxylate esters;

7) hydrophilizing additive: powdered sodium oleate with a substance content of at least 95 %;

8) organic multifunctional additive acting as a viscosity modifier with internal code VM-XG;

9) drinking tap water in accordance with GOST 23732–2011.

The costs of the components for obtaining the research material were accepted based on a previously developed composition used in studying the rheological properties and technological indicators of a mortar mixture with a modifying component. The amount of water repellent for preparing the material was accepted as 0.3 % of the dry mixture weight. The adhesion strength of the mortar to the concrete base was determined according to the method specified in GOST R 58276–2018. The mortar mixture for the preparation of test specimens was prepared according to the following procedure: mixing of components for 120 seconds, then stopping the mixer for 90 seconds to remove the mortar mixture adhering to the blade and mixing bowl, followed by re-mixing for 60 seconds to ensure a total mixing time of 3 minutes.

The dry mixture was mixed with an 8 % aqueous solution of an organic multifunctional additive. To ensure complete dispersion of the modifying component in the liquid phase, the swelling modifier was periodically mixed using a drill with a blade attachment at a speed of no more than 450 rpm. In order to eliminate the influence of non-hydrated particles of the organic multifunctional additive on the formation of defects in the hardened gypsum stone, the prepared gel was used as a binder for the dry mixture no earlier than 90 minutes after the start of preparation of the viscosity modifier solution.

The prepared solution mixture was applied to the surface of the concrete base plate, manufactured in accordance with the requirements of GOST R 58277–2018, using a spatula with a blade width of 10 mm in one pass, pressing the mixture and levelling the front surface of the specimens with a steel ruler. A silicone applicator was used to make specimens with a rib length of 50 mm, ensuring a 5 mm thick layer of mor-

tar mixture. The applicator was removed from the base plate while maintaining the properties of the mortar mixture. The outer edge was first cut along the applicator holes with a blade to prevent damage to the integrity of the manufactured specimens.

The base plate with test specimens was stored for 7 days in a room maintaining a temperature and relative humidity of $t = (22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ and $\phi = (52 \pm 10) \%$, respectively. After the storage period, square steel stamps (50 mm edge length) were glued to the hardened specimens using a two-component epoxy resin-based adhesive. Before gluing the stamps, the surface of the test material was levelled by sanding the specimens with sandpaper, followed by dust removal. The adhesion pull-off test of the specimens from the concrete slab was carried out 24 hours after the stamps were glued using a portable testing machine for measuring the pull-off force (adhesion) HP 1000 Haftprüfsystem using a hydraulic power cylinder with a maximum measurable peel force of 9 kN at a load increase rate of $250 \pm 50 \text{ N/s}$.

RESEARCH RESULTS

The results of research into material for ACP using an organic multifunctional additive established its effect on adhesion strength to concrete substrates and compatibility with a water repellent in the composition of hardened mortar (Fig. 1).

From the adhesion strength values obtained for a series of specimens, a decrease in the adhesion of the material to the concrete base from 0.53 to 0.35 MPa can be observed when a water-repellent additive is added together with a modifier to the dry mix. This phenomenon is confirmed by the mechanism of action of hydrophobic components, which involves chemical processes at the interface between the surface of the hardening mortar and the base, as well as inside microdefects in the concrete, with the formation of films that prevent further capillary suction of water from the mortar mixture, which is necessary for the formation of a physicochemical bond with the concrete [18, 19].

During a visual assessment of the nature of the detachment (Fig. 2), it was determined that specimens of hardened stone composition with the use of an organic



Fig. 2. Appearance of specimens for determining the adhesion strength of the material for ACP with a concrete base: *a* — before gluing the stamps; *b* — after tearing off a series of specimens with an organic modifying additive; *c* — after tearing off a series of specimens with an organic modifying additive and a water repellent

multifunctional additive provided 55.2 % cohesive failure and 44.8 % adhesive failure in a series of test specimens. At the same time, a series of specimens made using a combination of a modifying component and a water repellent has a proportion of the surface of the tested solution with destruction of the base material equal to 25.3 %.

This change in the nature of separation from the concrete surface when a water repellent is included in the mortar mixture can be explained by the assumption that many types of additives from this group have a plasticizing effect, which increases the penetrating ability of the mortar mixture, filling microdefects and capillary pores in the concrete base [20, 21]. This assumption is also confirmed by the improved workability of the mortar mixture and the ease of mixing it in the mixer bowl.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The possibility of combining an organic rheological modifier and a water repellent to ensure the adhesive

strength of a mortar mixture for 3D printing on a composite gypsum binder with an optimal ratio of components for interlayer adhesion has been substantiated.

It has been established that the introduction of a water repellent together with a modifying additive contributes to a decrease in adhesive strength to concrete. The use of volumetric water repellent leads to a 34.2 % decrease in adhesion strength. The study of the nature of the detachment of the hardened mortar from the concrete base indicates an increase in the penetrating ability of the mortar mixture, which is explained by the positive effect of the water repellent on improving the consistency of the mortar mixture and ensuring the cohesion of the system.

The relevance of future research lies in determining the optimal ratio of the water repellent and the multifunctional organic additive to ensure high adhesion strength of the hardened material and the penetrating ability of the mortar component.

REFERENCES

1. Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX. (rus.).
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):127-134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB. (rus.).
3. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015; 6(6):14-22.
4. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 143:172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
5. Goncharova J.Y., Drobotov A.V., Torubarov I.S., Volokhov M.A. A study of adhesion properties of surfaces for 3D-printing. *Cifra. Engineering*. 2024; 2(3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM. (rus.).
6. Tolstoi A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2016; 2(17):174-180. EDN WHAIQB. (rus.).
7. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202
8. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:26-31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26
9. Suleymanova L., Malyukova M., Slepukhin A., Krushel'nickaya E., Tolstoy A. Influence of modifying agent with hydrophobization effect on increase of operational characteristics of vibropressed products. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 9:8-13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR. (rus.).
10. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Construction Technologies*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).
11. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. The control of rheological behaviour for 3d-printable building mixtures: experimental evaluation of “nano” tools prospects. *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2019; 11(3):325-334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG. (rus.).
12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 59-65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9
13. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Construction Materials*. 2018; 12:34-40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV. (rus.).
14. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Kotova K.S., Shvedova M.A., Yurov P.Yu. Study of the strength regulation factors for the adhesive bonding “cement matrix – reinforcing fiber” in composites for 3D-build printing. *Nanotechnologies in Construction : a Scientific Internet-Journal*. 2023; 15(2):124-133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN HIGENO. (rus.).
15. Wang Y., Qiu L., Chen S., Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403
16. Stroganov V.F., Amelchenko M.O., Mukhametrakhimov R.Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increase in adhesion degree of sterol-acrylic coatings, modified with schungite-filler, for protection of building materials. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2021; 9:29-32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL. (rus.).
17. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings. *ACI Materials Journal*. 2021; 118(6). DOI: 10.14359/51733105
18. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Construction Technologies*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).
19. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics. *Applied Surface Science*. 2018; 450:492-501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204
20. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes. *Petroleum Chemistry*. 2018; 58(4):279-288. DOI: 10.1134/s0965544-118040035
21. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study. *RILEM Bookseries*. 2020; 978-987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S: **Ilya O. Rabbaa** — engineer of the Research Institute of Building Materials and Technologies, postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ilya_rabbaa@mail;

Oksana A. Larsen — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; LarsenOA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Ilya O. Rabbaa — study concept, material collection, sample preparation, testing, results processing, writing the original text, drawing up the conclusion.

Oksana A. Larsen — scientific supervision, study concept, scientific consulting, text revision, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Применение технологий искусственного интеллекта для разработки проектов по реконструкции зданий

Павел Алексеевич Кравченко, Юлия Германовна Жеглова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются разные варианты автоматизации подготовки проектов реконструкции зданий. Когда речь идет о таких проектах, приходится сталкиваться с огромным спектром задач: например, анализ технического состояния здания и различные требования по нормам, технические ограничения в их числе. В связи с этим реконструкция — процесс сложный и, можно сказать, трудоемкий, который требует много сил и времени. В век активно развивающейся автоматизации и цифровизации особенно важно делать проектирование быстрее и эффективнее, чтобы экономить время специалистов. В таких условиях цифровые технологии становятся практически незаменимы, потому что помогают улучшить качество документации и уменьшить число ошибок. Актуальность этой темы объясняется тем, что цифровизация строительной отрасли развивается очень быстро, а практическая польза заключается в том, что проектные решения становятся надежнее, а также эффективней.

Материалы и методы. Предлагается подход, в котором используются и информационное моделирование зданий (BIM), и алгоритмы для анализа проектных данных. Такая методика соединяет цифровое моделирование и автоматическую обработку информации, что помогает автоматизировать некоторые рутинные задачи и облегчить труд проектировщиков.

Результаты. С помощью предложенной методики можно создать подробные цифровые модели, которые применяются как основа для проектных решений. При этом всегда учитываются сведения инженерных изысканий и необходимые нормативы, поэтому документация соответствует всем требованиям. Разработана концепция автоматизированной системы, совмещающая обработку информации, выявление некоторых проблем и подготовку всей документации. Система анализирует исходную информацию и предлагает разные, иногда очень разные варианты организации реконструкции с учетом технических и экономических факторов.

Выводы. Внедрение этого подхода позволяет существенно ускорить подготовку проектов, сделать расчеты точнее и снизить количество ошибок. Такие решения помогают использовать ресурсы рациональнее и дают возможность продвигать цифровизацию в реконструкции зданий еще дальше.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, BIM-технологии, системный анализ, реконструкция зданий, нейронные сети, автоматизация проектирования, проект организации реконструкции, машинное обучение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кравченко П.А., Жеглова Ю.Г. Применение технологий искусственного интеллекта для разработки проектов по реконструкции зданий // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.10

Автор, ответственный за переписку: Юлия Германовна Жеглова, JeglovaYUG@mgsu.ru.

The use of artificial intelligence technologies for the development of building renovation projects

Pavel A. Kravchenko, Yulia G. Zheglova

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

ABSTRACT

Introduction. This work is dedicated to the study and development of approaches to applying artificial intelligence (AI) technologies for the automation of the development of organizational projects for building reconstruction. The reconstruction of construction objects is a complex and multifaceted process associated with a high degree of uncertainty, the need to consider numerous factors, and strict adherence to regulatory requirements. Given the growing need to optimize design processes and reduce labour costs, there is an objective necessity to create innovative methods that would enhance efficiency and minimize risks related to human error. The relevance of the study is driven by the digitalization of the construction industry, while its novelty lies in the integration of AI with modern design tools. The practical significance of the work is in its potential to improve project quality and reduce time expenditures.

Materials and methods. The study developed a methodology based on the comprehensive use of various types of neural networks adapted for data analysis and design automation. The proposed approach includes the integration of AI technologies with Building Information Modeling (BIM) tools.

Results. The developed methodology enables the creation of highly detailed digital models of objects, which serve as a basis for analysis and decision-making. The work accounts for engineering survey data and current regulatory requirements, ensuring compliance with standards. A concept of an automated system is proposed that combines the processing of large volumes of data, problem forecasting and automatic generation of documentation and is capable of analyzing input data, identifying optimal solutions and proposing options for organizing reconstruction taking into account technical and economic aspects.

Conclusions. The use of AI reduces project development time, improves calculation accuracy, minimizes errors, and ensures more rational resource use. The proposed methodology and system concept open new prospects for the digitalization and automation of the construction industry, contributing to the overall efficiency of reconstruction processes.

KEYWORDS: artificial intelligence, BIM technologies, system analysis, building reconstruction, neural networks, design automation, reconstruction organization project, machine learning

FOR CITATION: Kravchenko P.A., Zhiglova Yu.G. The use of artificial intelligence technologies for the development of building renovation projects. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.10

Corresponding author: Yulia G. Zhiglova, JeglovaYUG@mgso.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция объектов строительства требует значительных аналитических и проектных работ, включая анализ существующего состояния объекта, инженерных изысканий и нормативных требований. Использование искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации разработки проекта организации реконструкции (ПОР) позволит снизить трудозатраты, минимизировать ошибки и ускорить процесс проектирования [1].

В настоящей работе предлагается концепция автоматизированной системы, формирующей части ПОР на основе различных источников данных:

- BIM-модель существующего объекта (форматы IFC, Renga, Revit);
- 3D-модель объекта с предполагаемыми изменениями;
- информация инженерных изысканий (геодезия, геология, гидрометеорология);
- исторические сведения по строительству и эксплуатации (расходы, затраты на материалы, отклонения от плана);
- нормативные требования (СНиП, СП, ГОСТ, ТКП);
- планировочные ограничения (городские регламенты, соседние здания, зоны строительства);
- технические характеристики машин и механизмов (для подбора оптимального набора техники);
- реальные графики производства работ (собранные из аналогичных проектов).

Архитектура предлагаемой автоматизированной системы включает в себя несколько ключевых модулей. Генеративные модели ИИ обеспечивают формирование базового технологического плана выполнения работ. Рекуррентные нейронные сети (НС) реализуют функцию оптимального планирования и распределения материально-технических и трудовых ресурсов. Графовые НС осуществляют анализ взаимосвязей между конструктивными элементами здания, а технологии обработки естественного языка обеспечивают автоматическое извлечение и интерпретацию данных из нормативно-технической документации [2].

В рамках решения поставленных задач используется комплекс математических методов:

- алгоритмы многокритериальной оптимизации;
- эволюционные вычисления на основе генетических алгоритмов;
- методы кластерного анализа информации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для автоматического формирования ПОР следует выстроить конвейер обработки данных, который обеспечит передачу информации от BIM-модели (Renga) к нейросети. Это включает несколько ключевых этапов.

Первый этап — извлечение сведений из Renga. Для интеграции можно использовать IFC как универсальный формат обмена BIM-данными, API Renga для прямого доступа к модели или скрипты на Python для работы с IFC-файлами [3].

Типы извлекаемой информации:

- геометрические характеристики — размеры, объемы, площади;
- конструктивные элементы — стены, перекрытия, колонны, фундаменты;
- материалы — бетон, сталь, кирпич и их свойства;
- инженерные сети — расположение коммуникаций, нагрузочные характеристики;
- дефекты и повреждения — если в BIM-модели есть метки с дефектами;
- рабочие нагрузки и техпроцессы — данные по текущей эксплуатации здания [4].

После извлечения сведения конвертируются в табличный или графовый формат для дальнейшего анализа.

Модель автоматизированной системы можно представить в следующем виде (в виде набора функциональных модулей):

$$S = \{P, G, V, U\}, \quad (1)$$

где P — модуль обработки и анализа IFC-файлов (IFCProcessor); G — модуль генерации описаний (IFCDescriptionGenerator); V — модуль визуализации 3D-моделей (IFCViewer); U — пользовательский интерфейс (IFCAnalyzerUI).

Интегральная модель системы генерации описаний определяется следующим образом:

$$F_{IFC} \rightarrow (Q, F, T, C, S) \rightarrow D \rightarrow O, \tag{2}$$

где F_{IFC} — исходный файл модели; Q — качество модели; F — характеристики объекта; T — тип здания; C — тип конструктивной системы; S — пространственная структура; D — текстовое описание; O — визуализированный результат.

Оценка качества модели производится по следующей формуле:

$$Q_{\text{итог}} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i, \tag{3}$$

где $Q_{\text{итог}}$ — итоговая оценка качества модели; n — количество оцениваемых критериев; Q_i — оценка модели по i -му критерию.

На втором этапе выполняется подготовка данных для последующей передачи в систему. Этот процесс включает несколько шагов: очистку и нормализацию (удаление дубликатов, исправление ошибок), преобразование информации в удобный для машинного анализа формат, а также дополнение набора сведениями из внешних источников, например нормативных документов или архивных сведений. В результате данные могут быть представлены в табличной, графовой или текстовой форме.

После подготовки информация поступает в систему, которая анализирует объект и формирует ПОР. Система включает три ключевых модуля:

1. Модуль анализа текущего состояния объекта и прогнозирования изменений применяет графовые НС для выявления связей между конструктивными элементами; определяет аварийные участки, потенциальные дефекты и необходимость усиления конструкций.

2. Модуль оптимизации плана реконструкции использует рекуррентные НС для прогнозирования оптимальной последовательности работ; применяет генетические алгоритмы для построения наиболее эффективного плана реконструкции.

3. Модуль генерации документации анализирует нормативные документы с помощью NLP-модели и формирует текстовую часть ПОР; на базе генеративных моделей создает графики работ, сметные документы и ведомости ресурсов.

На выходе система подготавливает полный пакет проектной документации: технологические карты (с описанием этапов и необходимых ресурсов), графики производства работ (диаграммы Ганта, календарные планы), а также ведомости потребности в материалах, технике и рабочей силе. Все это формируется в соответствии с заданным шаблоном и представляет собой готовый проект организации реконструкции. Блок-схема предлагаемого решения представлена на рис. 1.

Интеграция с проектной документацией

Извлеченные данные структурируются в JSON-шаблоны, автоматически пополняющие разделы:

- историческая справка;
- ограничения на модификацию конструкций;
- рекомендации по материалам.

Система выделяет конфликтующие требования красным маркером, предлагая инженеру варианты

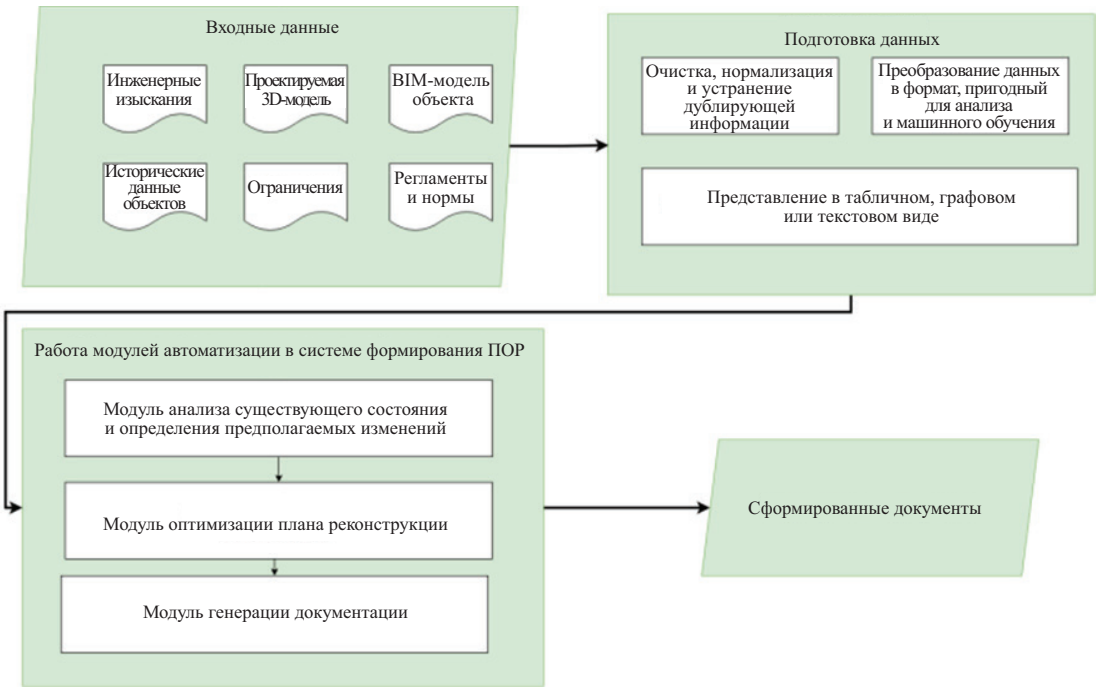


Рис. 1. Схема предлагаемого решения

разрешения противоречий. Для многостраничных документов реализован механизм перекрестных ссылок, связывающий упоминания объектов в тексте с их графическими представлениями.

Интеграция с системой происходит через динамические шаблоны. Каждое выявленное ограничение автоматически генерирует метку в трехмерной модели, а спорные требования оформляются как задачи для инженера. При изменении нормативной базы система пересматривает архивные документы, предлагая актуализировать параметры конструкций, затронутых поправками.

Взаимодействие с другими модулями

- 1. Генетические алгоритмы получают от NLP список охраняемых элементов.
- 2. Графовые сети используют извлеченные параметры материалов для расчета нагрузок.
- 3. LSTM-модели учитывают нормативные сроки согласований при прогнозе.
- 4. Система документооборота формирует отчеты на основе структурированных данных.

Обработка естественного языка становится связующим звеном между исторической информацией и цифровыми методами проектирования, обеспечивая преемственность решений на всех этапах реконструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приложение для извлечения данных в формат IFC

Рассмотрим графический интерфейс разработанного приложения и его возможности в рамках

первого этапа концепции — извлечение данных из Renga (рис. 2, 3).

Разработанное приложение позволяет переводить IFC-модель в машиночитаемый формат и получать сгенерированное описание модели (рис. 4).

Также имеется возможность экспорта описания и характеристик модели в формат Excel. На рис. 5 представлена визуализация процесса выгрузки данных для отчетов из модели.

Классификация BIM-моделей проводится на основе оценки их качества по четырем основным критериям [5–8]:

- полнота геометрической информации — определяется количеством и разнообразием элементов модели (стены, перекрытия, колонны, окна, двери и т.д.);
- полнота атрибутивной информации — оценивается наличие ключевых характеристик здания (название, тип, описание, этажность), а также заполненность данных по помещениям и материалам;
- пространственная структура атрибутивной информации — устанавливается корректность иерархии этажей и помещений;
- детализация модели — зависит от количества второстепенных элементов (мебель, ограждения, лестницы, инженерные сети) [9].

Анализ качества модели автоматизированной системой производится в два этапа: каждый из критериев нормируется по шкале от 1 до 10 и определяется его оценка Q_i . Соответственно, чем больше элементов содержит модель и чем разнообразнее ее типология, т.е. чем выше уровень детализации

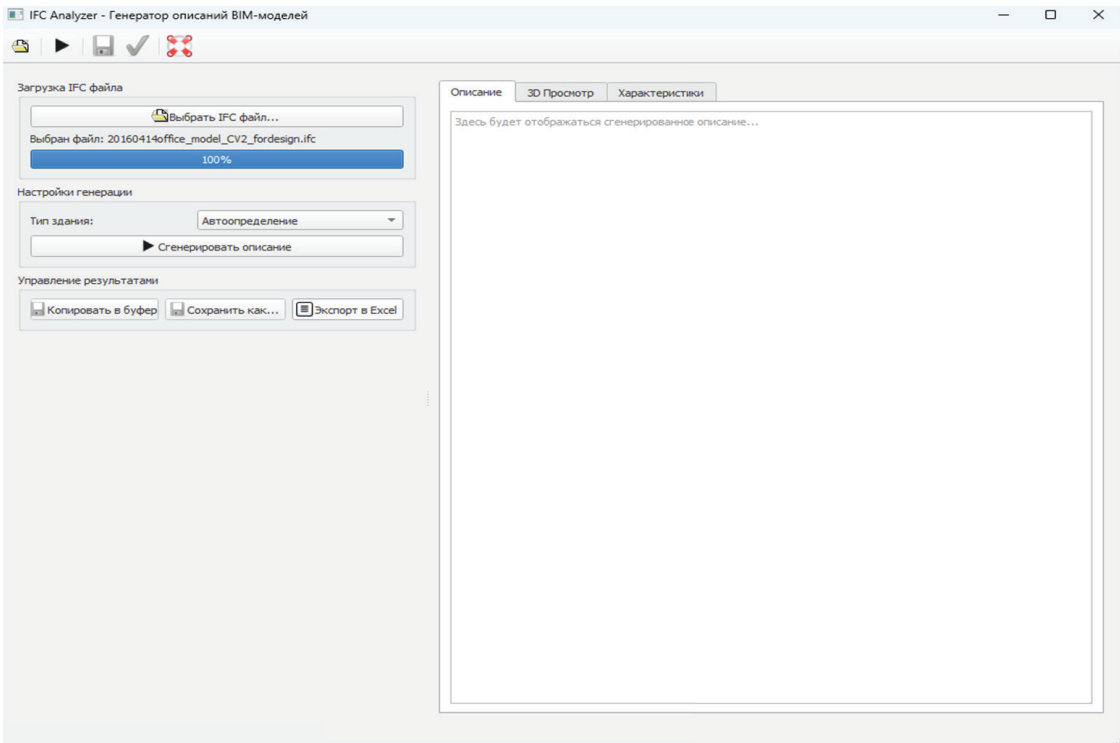


Рис. 2. Графический интерфейс программы

модели, тем выше оценка Q_i по соответствующему критерию; далее определяется итоговая оценка модели $Q_{\text{итог}}$ согласно формуле (3).

В работу автоматизированной системы положена следующая классификация моделей в соответствии с полученной оценкой [10, 11]:

- 9–10 баллов — высокое качество, соответствие BIM Level 2;

- 7–8 баллов — хорошее качество, пригодность для большинства проектных задач;
- 5–6 баллов — среднее качество, необходима доработка;
- 3–4 балла — низкое качество, значительные пробелы;
- 1–2 балла — очень низкое качество, не рекомендуется к использованию.

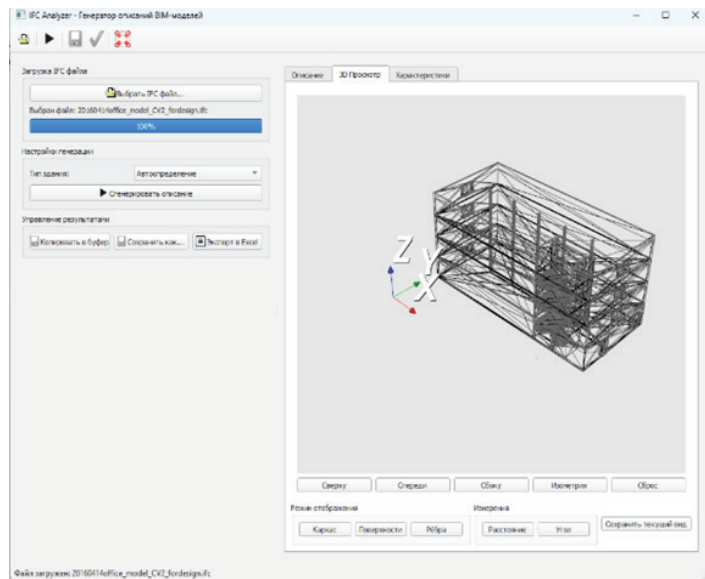


Рис. 3. Модуль трехмерной визуализации

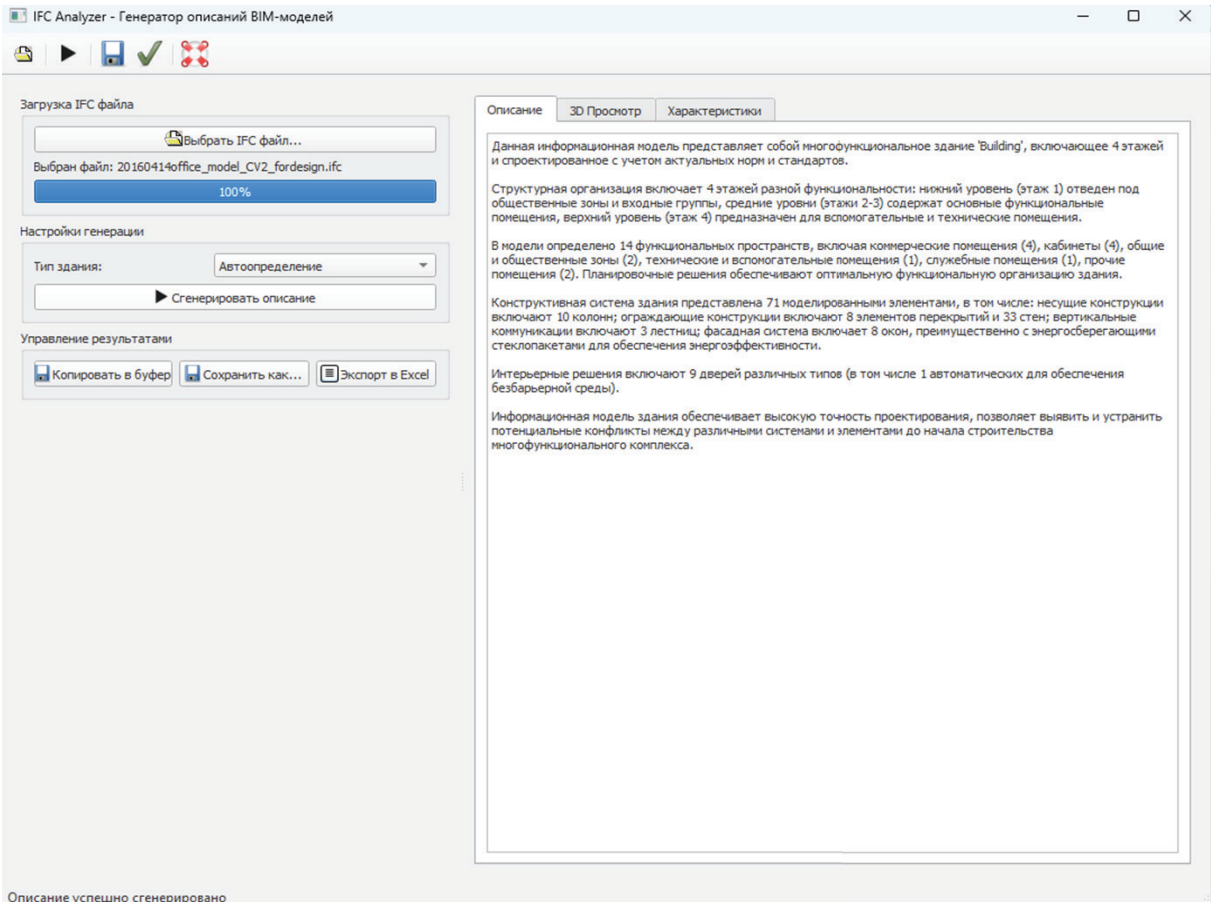


Рис. 4. Описание IFC-модели

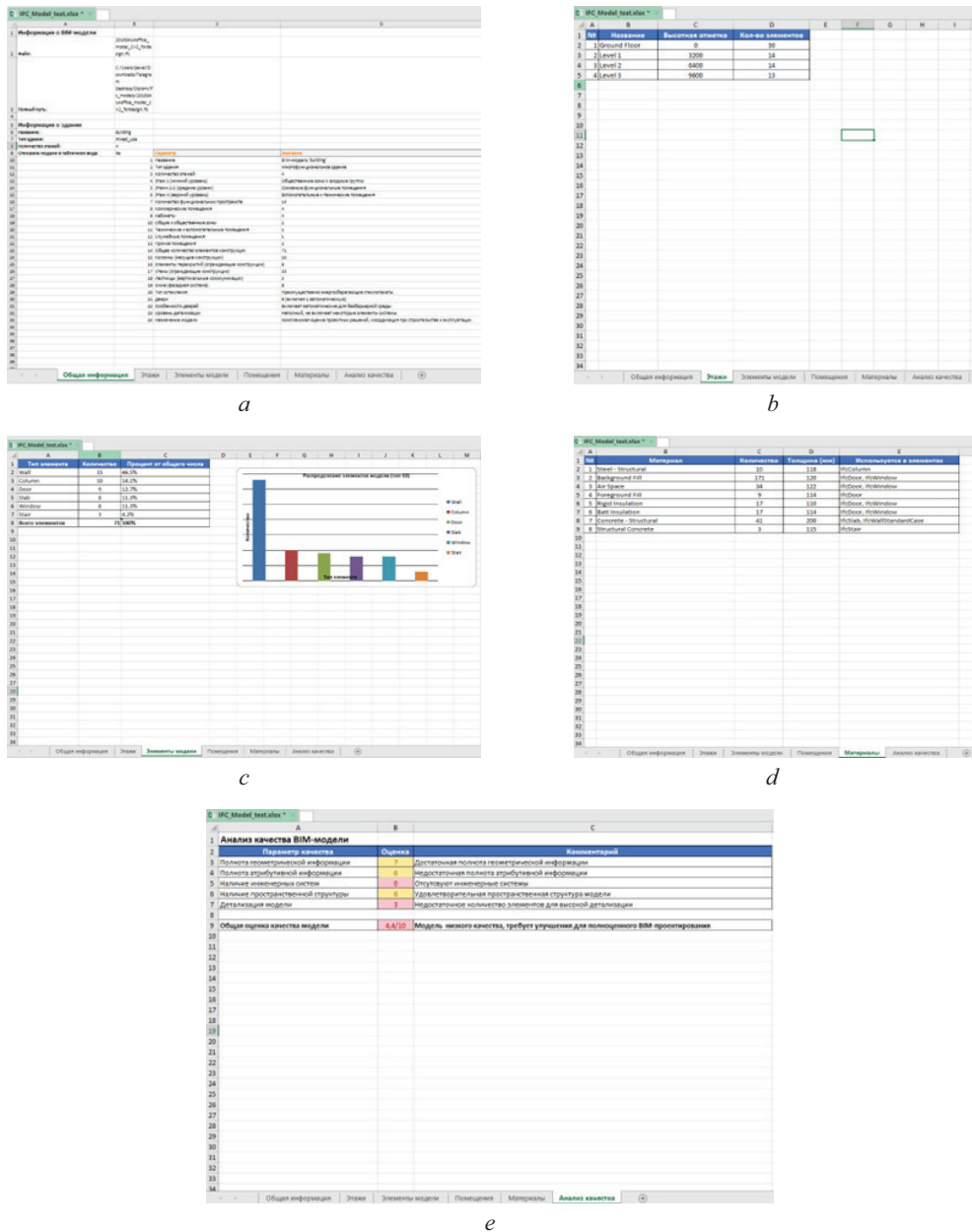


Рис. 5. Визуализация данных, выгружаемых из модели: *a* — общая информация; *b* — этажи; *c* — элементы модели; *d* — материалы; *e* — анализ качества

Такой подход позволяет не только дать количественную оценку модели, но и классифицировать ее по уровню качества для последующего применения в автоматизированных системах реконструкции [12]. Кроме того, методика интегрируется с экспортом данных в Excel, где формируются отчеты по этажам, элементам, помещениям и материалам. В таблицах автоматически выделяются ключевые показатели и строятся диаграммы распределения элементов. Результаты оценки могут быть использованы для автоматического формирования проектной документации, включая графики работ, ресурсные ведомости и технологические карты [13]. Таким образом, классификация BIM-моделей объединяет количественные метрики, экспертные правила и визуализацию данных, обеспечивая ком-

плексный подход к определению качества и пригодности моделей для проектирования и реконструкции. Разработанная в работе методика является универсальной и может применяться в автоматизированных системах поддержки проектных решений в строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе приведены концепция и подробное описание автоматизированной системы, формирующей часть ПОР с помощью методов ИИ [14]. Разрабатываемая система извлекает информацию из BIM-модели, что уже реализовано авторами и продемонстрировано на примере в рамках разработанного приложения. В дальнейшем на основании

предложенной концепции автоматизированная система будет генерировать оптимальный план реконструкции, включающий последовательность демонтажных, подготовительных и строительных мероприятий, проводить оценку возможных рисков, а также автоматически формировать проектные ведомости, включая технологические карты, графики производства работ и ресурсные расчеты.

Применение методов ИИ и накопленных данных о ранее выполненных проектах позволит ис-

пользовать проверенные решения для новых объектов, снижая количество ошибок и ускоряя разработку проекта организации реконструкции. Комплексный подход, объединяющий анализ связей между элементами здания, прогнозирование оптимального порядка работ и генерацию необходимых документов, создаст гибкую систему, способную не только автоматизировать рутинные процессы, но и повысить эффективность всего процесса реконструкции в целом [15].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров К.С., Швеи Ю.С., Корнилов Б.Д., Шелкоплясов А.О. Применение BIM-технологий при проектировании и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 173. EDN SWKDZX.
2. Король Е.А., Дрепалов И.Ф. Реконструкция зданий с использованием BIM-технологий // Системные технологии. 2021. № 4 (41). С. 47–51. DOI: 10.55287/22275398_2021_4_47. EDN CSOOOU.
3. Мищенко А.С. Использование технологии нейронных сетей в строительной деятельности // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. 2024. № 2 (67). С. 21–25. DOI: 10.52928/2070-1632-2024-67-2-21-25. EDN ZLJQOY.
4. Селютин Л.Г. Современные информационные технологии с позиции эксплуатации объекта капитального строительства: от информационной модели к FM // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. 2018. Т. 4. № 1. С. 15-23. DOI: 10.18413/2408-9346-2018-4-1-15-23. EDN LZGFTN.
5. Хатин А.В., Махиев Б.Е., Ударцева А.Н. Использование BIM-модели производственного здания при реконструкции // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 13-19. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.002. EDN MLESNU.
6. Раховецкий Г.А., Коркишко А.Н. Информационная модель проекта – как основа оптимизации стоимости на всех стадиях реализации проектов обустройства, на примере компании «Газпром нефть» // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1 (44). С. 56. EDN ZBBNGN.
7. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: a critical review and future trends // Automation in Construction. 2021. Vol. 122. P. 103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517. EDN TXFZKN.
8. Tang P., Akinci B., Huber D. Efficient and Effective Quality Assessment of As-Is Building Information Models and 3D Laser-Scanned Data // Computing in Civil Engineering (2011). 2011. Pp. 486–493. DOI: 10.1061/41182(416)60
9. Hidayat A.R.T., Prasetya Y.E., Dinanti D. Village Development Index and ICT Infrastructure in Tourism Region // Journal of Indonesian Tourism and Development Studies. 2019; 7(3):166-174. DOI: 10.21776/ub.jitode.2019.007.03.05
10. Zhou Y., She J., Huang Y., Li L., Zhang L., Zhang J. A Design for Safety (DFS) Semantic Framework Development Based on Natural Language Processing (NLP) for Automated Compliance Checking Using BIM: The Case of China // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 780. DOI: 10.3390/buildings12060780
11. Ding Z., Liu S., Liao L., Zhang L. A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects // Automation in Construction. 2019. Vol. 102. Pp. 45–58. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.012
12. Martinez J.G., Albeaino G., Gheisari M., Volkman W., Alarcón L.F. UAS Point Cloud Accuracy Assessment Using Structure from Motion–Based Photogrammetry and PPK Georeferencing Technique for Building Surveying Applications // Journal of Computing in Civil Engineering. 2016. Vol. 35. Issue 1. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000936
13. Oliveira B.A.S., Neto A.P.D.F., Ferdinando R.M.A., Carvalho R.F., Fernandes A.L., Guimaraes F.G. Automated Monitoring of Construction Sites of Electric Power Substations Using Deep Learning // IEEE Access. 2021; 9:19195-19207. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3054468
14. Skrzypczak I., Oleniack G., Leśniak A., Zima K., Mrówczyńska M., Kazak J.K. Scan-to-BIM Method in Construction: Assessment of the 3D Buildings Model Accuracy in Terms Inventory Measurements // Building Research & Information. 2022. Vol. 50. Issue 8. Pp. 859–880. DOI: 10.1080/09613218.2021.2011703
15. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research // Automation in Construction. 2020; 114:103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Павел Алексеевич Кравченко — магистр; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; pavelakrav@gmail.com;

Юлия Германовна Жеглова — кандидат технических наук, доцент, 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: 940377, Scopus: 57202228987, ResearcherID: AAC-8875-2022, ORCID: 0000-0001-8121-8535; JeglovaYUG@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Кравченко П.А. — разработка концепции, проведение исследования и расчетов, визуализация, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта.

Жеглова Ю.Г. — разработка концепции, проведение исследования, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The reconstruction of construction projects requires significant analytical and design work, including analysis of the existing condition of the facility, engineering surveys, and regulatory requirements. The use of artificial intelligence (AI) to automate the development of a reconstruction project (RP) will reduce labour costs, minimize errors and speed up the design process [1].

This paper proposes a concept for an automated system that generates parts of the RP based on various data sources:

- BIM model of the existing facility (IFC, Renga, Revit formats);
- 3D model of the facility with proposed changes;
- engineering survey information (geodesy, geology, hydrometeorology);
- historical data on construction and operation (expenses, material costs, deviations from the plan);
- regulatory requirements (SNIIP, CP, GOST, TKP);
- planning restrictions (urban regulations, neighbouring buildings, construction zones);
- technical characteristics of machines and mechanisms (for selecting the optimal set of equipment);
- actual work schedules (collected from similar projects).

The architecture of the proposed automated system includes several key modules. Generative AI models provide the formation of a basic technological plan for the execution of work. Recurrent neural networks (NN) implement the function of optimal planning and distribution of material, technical and labour resources. Graphical NN analyze the relationships between the structural elements of a building, and natural language processing technologies provide automatic extraction and interpretation of data from regulatory and technical documentation [2].

A set of mathematical methods is used to solve the tasks at hand:

- multi-criteria optimization algorithms;
- evolutionary computing based on genetic algorithms;
- methods of cluster analysis of information.

MATERIALS AND METHODS

To automatically generate RP, a data processing pipeline must be set up to transfer information from the BIM model (Renga) to the neural network. This involves several key steps.

The first stage is to extract information from Renga. For integration, you can use IFC as a universal BIM data exchange format, the Renga API for direct access to the model, or Python scripts for working with IFC files [3].

Types of information extracted:

- geometric characteristics — dimensions, volumes, areas;
- structural elements — walls, floors, columns, foundations;
- materials — concrete, steel, brick and their properties;
- engineering networks — location of communications, load characteristics;
- defects and damage — if there are defect tags in the BIM model;
- working loads and technical processes — data on the current operation of the building [4].

After extraction, the information is converted into a tabular or graph format for further analysis.

The model of the automated system can be represented as follows (as a set of functional modules):

$$S = \{P, G, V, U\}, \quad (1)$$

where P is the IFC file processing and analysis module (IFCProcessor); G is the description generation module (IFCDescriptionGenerator); V is the 3D model visualization module (IFCViewer); U is the user interface (IFCAnalyzerUI).

The integral model of the description generation system is defined as follows:

$$F_{IFC} \rightarrow (Q, F, T, C, S) \rightarrow D \rightarrow O, \tag{2}$$

where F_{IFC} is the source model file; Q is the model quality; F is the object characteristics; T is the building type; C is the structural system type; S is the spatial structure; D is the text description; O is the visualized result.

The model quality is assessed using the following formula:

$$Q_{tot} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i, \tag{3}$$

where Q_{tot} is the final model quality assessment; n is the number of criteria assessed; Q_i is the model assessment according to the i -th criterion.

The second stage involves preparing data for subsequent transfer to the system. This process includes several steps: cleaning and normalization (removing duplicates, correcting errors), converting information into a format suitable for machine analysis, and supplementing the data set with information from external sources, such as regulatory documents or archival data. As a result, the data can be presented in tabular, graph or text form.

After preparation, the information is sent to the system, which analyses the object and generates an RP.

The system includes three key modules:

1. The module for analyzing the current state of the object and forecasting changes uses graph neural

networks to identify connections between structural elements; it determines emergency areas, potential defects and the need to reinforce structures.

2. The reconstruction plan optimization module uses recurrent neural networks to predict the optimal sequence of works; it applies genetic algorithms to build the most effective reconstruction plan.

3. The documentation generation module analyses regulatory documents using an NLP model and generates the text part of the RP; based on generative models, it creates work schedules, cost estimates and resource statements.

The system outputs a complete package of project documentation: process charts (describing the stages and necessary resources), work schedules (Gantt charts, calendars), as well as lists of material, equipment and labour requirements. All this is generated in accordance with a specified template and represents a ready-made reconstruction project. A block diagram of the proposed solution is shown in Fig. 1.

Integration with project documentation

The extracted data is structured into JSON templates that automatically populate the following sections:

- historical reference;
- restrictions on design modifications;
- recommendations on materials.

The system highlights conflicting requirements with a red marker, offering the engineer options for resolving the contradictions. For multi-page documents, a cross-reference mechanism is implemented, linking references to objects in the text with their graphical representations.

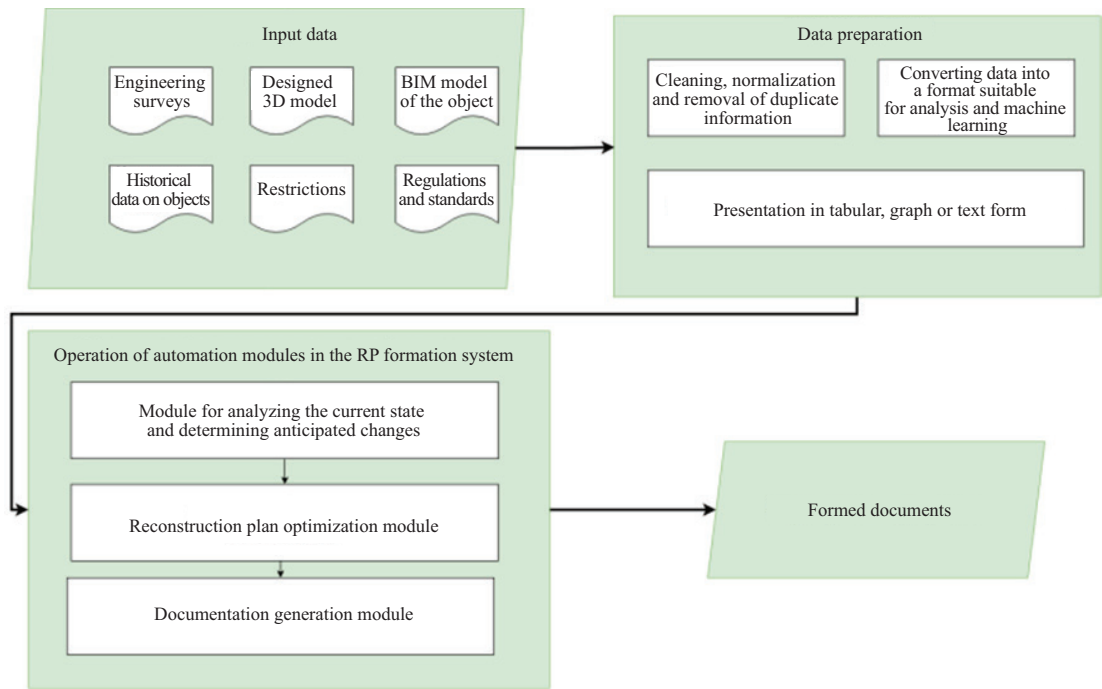


Fig. 1. Diagram of the proposed solution

Integration with the system occurs through dynamic templates. Each identified constraint automatically generates a label in the 3D model, and conflicting requirements are formalized as tasks for the engineer. When the regulatory framework changes, the system reviews archived documents, suggesting updates to the parameters of structures affected by the amendments.

Interaction with other modules

1. Genetic algorithms receive a list of protected elements from NLP.
2. Graph networks use the extracted material parameters to calculate loads.
3. LSTM models take into account regulatory approval deadlines when making forecasts.
4. The document management system generates reports based on structured data.

Natural language processing becomes the link between historical information and digital design methods, ensuring continuity of decisions at all stages of reconstruction.

RESEARCH RESULTS

Application for extracting data into IFC format

Let us consider the graphical interface of the developed application and its capabilities within the first stage of the concept — extracting data from Renga (Fig. 2, 3).

The developed application allows converting an IFC model into a machine-readable format and obtaining a generated description of the model (Fig. 4).

It is also possible to export the model description and characteristics to Excel format. Fig. 5 shows a visualization of the process of exporting data from the model for reports.

BIM models are classified based on an assessment of their quality according to four main criteria [5–8]:

- completeness of geometric information — determined by the number and variety of model elements (walls, floors, columns, windows, doors, etc.);
- completeness of attribute information — assessed by the presence of key building characteristics (name, type, description, number of floors), as well as the completeness of data on rooms and materials;
- spatial structure of attribute information — determined by the correctness of the hierarchy of floors and rooms;
- model detail — depends on the number of secondary elements (furniture, fences, stairs, engineering networks) [9].

The automated system analyses the quality of the model in two stages: each criterion is normalized on a scale from 1 to 10 and its Q_i rating is determined. Accordingly, the more elements the model contains and the more diverse its typology, i.e. the higher the level of detail of the model, the higher the Q_i rating for the corresponding criterion; then the final model rating Q_{tot} is determined according to formula (3).

The automated system uses the following classification of models according to the rating received [10, 11]:

- 9–10 points — high quality, compliance with BIM Level 2;

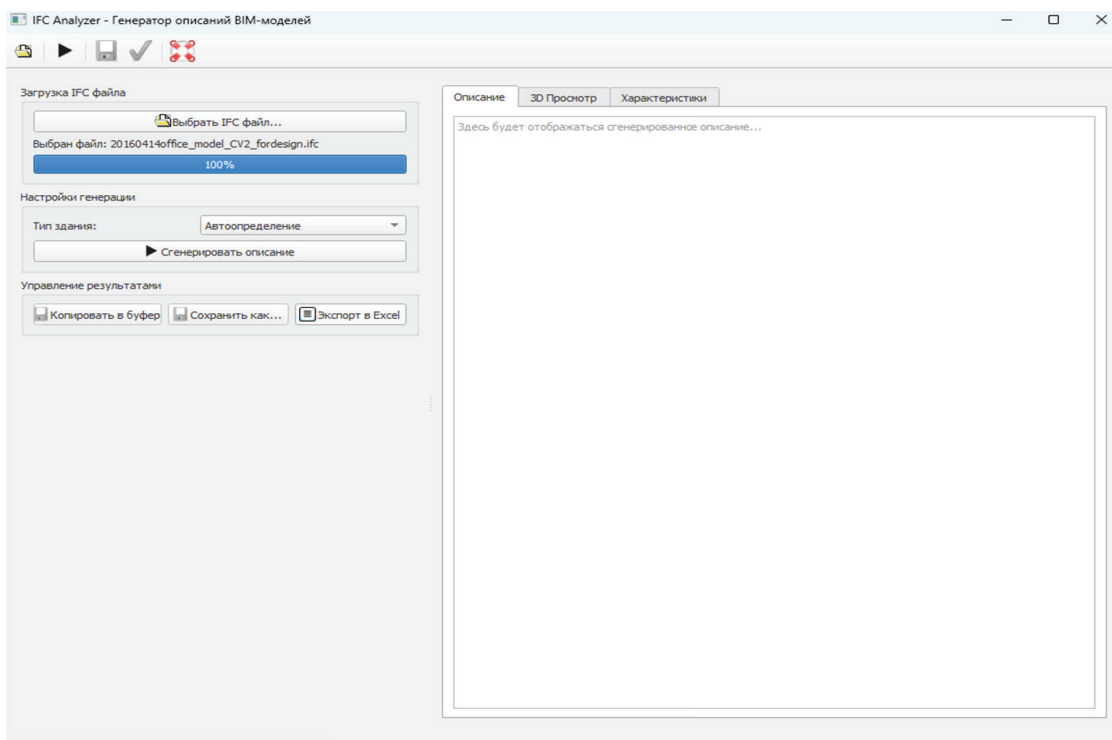


Fig. 2. Graphical user interface of the programme

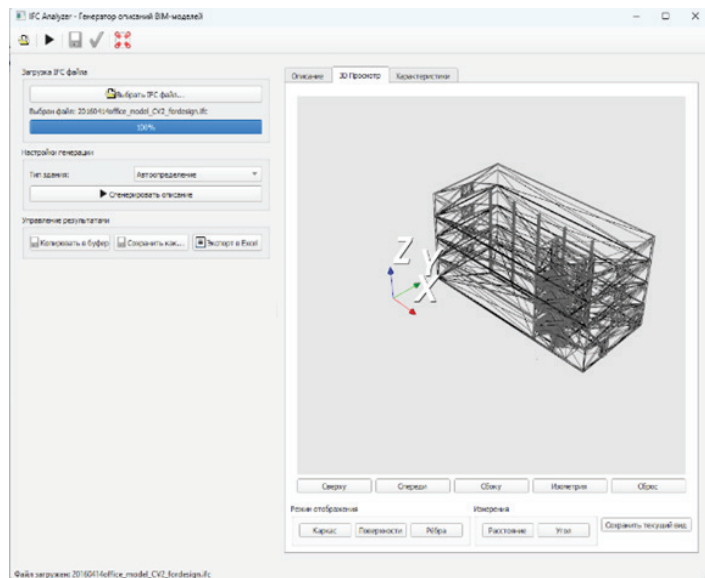


Fig. 3. Three-dimensional visualisation module

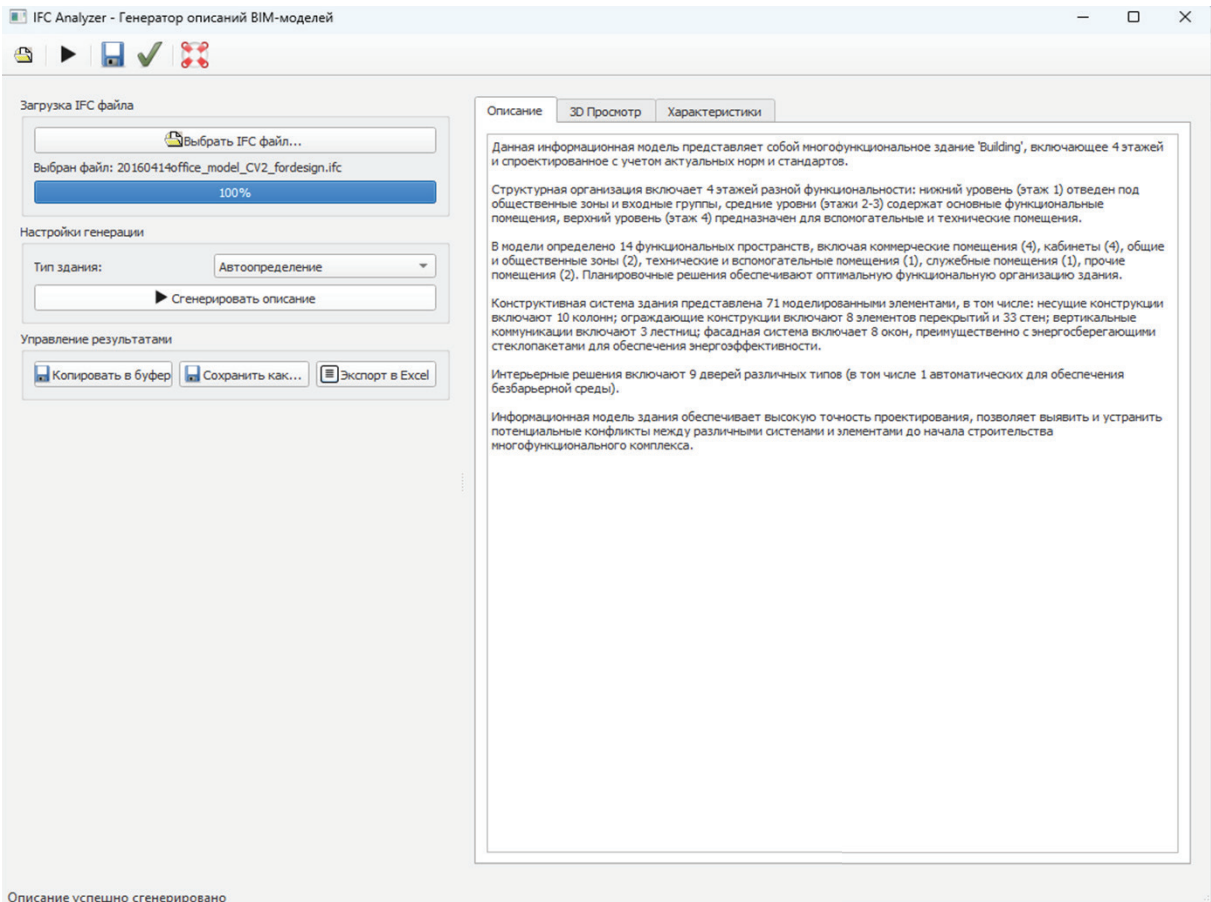


Fig. 4. Description of the IFC model

- 7–8 points — good quality, suitable for most design tasks;
- 5–6 points — average quality, requires refinement;
- 3–4 points — low quality, significant gaps;
- 1–2 points — very low quality, not recommended for use.

This approach allows not only to give a quantitative assessment of the model, but also to classify it by quality level for subsequent use in automated reconstruction systems [12].

In addition, the methodology is integrated with data export to Excel, where reports are generated by

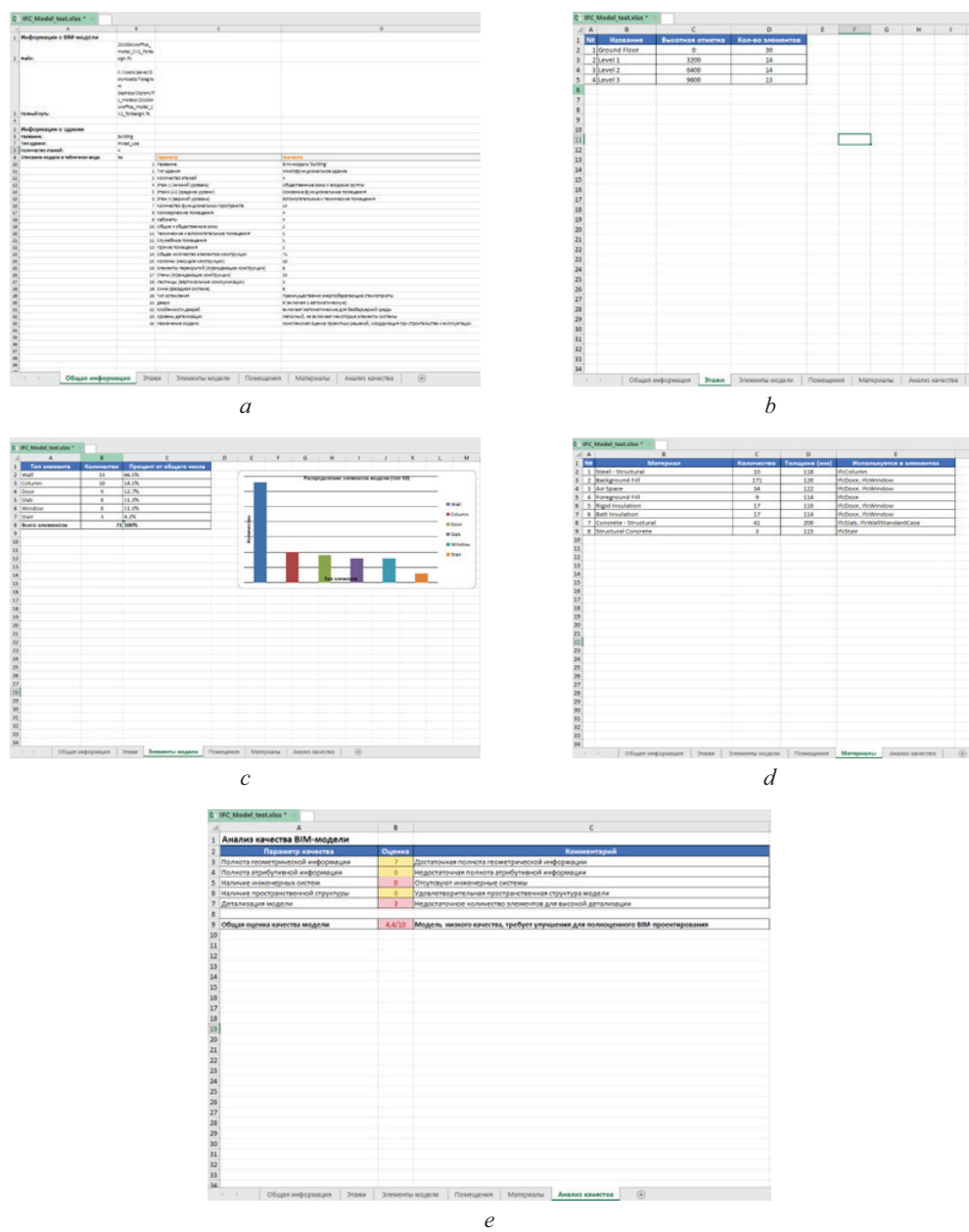


Fig. 5. Visualization of data exported from the model: *a* — general information; *b* — floors; *c* — model elements; *d* — materials; *e* — quality analysis

floor, element, room, and material. Key indicators are automatically highlighted in the tables and element distribution diagrams are constructed.

The assessment results can be used to automatically generate project documentation, including work schedules, resource statements, and technological maps [13].

Thus, the classification of BIM models combines quantitative metrics, expert rules, and data visualization, providing a comprehensive approach to determining the quality and suitability of models for design and reconstruction. The methodology developed in this work is universal and can be applied in automated systems for supporting design decisions in construction.

CONCLUSION AND DISCUSSION

This paper presents the concept and detailed description of an automated system that generates parts of the RP using AI methods [14]. The system under development extracts information from the BIM model, which has already been implemented by the authors and demonstrated in an example within the developed application. In the future, based on the proposed concept, the automated system will generate an optimal reconstruction plan, including a sequence of dismantling, preparatory and construction activities, assess possible risks, and automatically generate design specifications, including technological maps, work schedules and resource calculations.

The application of AI methods and accumulated data on previously completed projects will allow proven solutions to be used for new facilities, reducing the number of errors and speeding up the development of the reconstruction project. A comprehensive approach that combines analysis of the relationships

between building elements, forecasting the optimal order of work, and generating the necessary documents will create a flexible system capable of not only automating routine processes, but also increasing the efficiency of the entire reconstruction process as a whole [15].

REFERENCES

1. Petrov K., Shvets Y., Kornilov B., Shelkopyasov A. The use of BIM-technologies in the design and reconstruction of buildings and structures. *Engineering journal of Don*. 2018; 4(51):173. EDN SWKDZX. (rus.).
2. Korol E.A., Drepalov I.F. Reconstruction of buildings using BIM technologies. *System Technologies*. 2021; 4(41):47-51. DOI: 10.55287/22275398_2021_4_47. EDN CSOOOU. (rus.).
3. Mishchenko A. Using neural network technology in construction activities. *Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economic and legal sciences*. 2024; 2(67):21-25. DOI: 10.52928/2070-1632-2024-67-2-21-25. EDN ZLJQOY. (rus.).
4. Selyutina L.G. Modern information technologies from the position of operation of the object of capital construction: from information model to FM. Research result. *Business and Service Technologies*. 2018; 4(1):15-23. DOI: 10.18413/2408-9346-2018-4-1-15-23. EDN LZGFTN. (rus.).
5. Khapin A.V., Makhiyev B.E., Udarceva A.N. Using the BIM model of an industrial building in the reconstruction. *BIM modeling in construction and architecture tasks: materials of the VI International Scientific and practical conference*. 2023; 13-19. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.002. EDN MLESNU. (rus.).
6. Rahovetskij G.A., Korkishko A.N. The information model of the project - as the basis of value engineering at all stages of a project arrangement, in the example of the company "Gazprom Neft". *Engineering journal of Don*. 2017; 1(44):56. EDN ZBBNGN. (rus.).
7. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: a critical review and future trends. *Automation in Construction*. 2021; 122:103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517. EDN TXFZKN
8. Tang P., Akinci B., Huber D. Efficient and Effective Quality Assessment of As-Is Building Information Models and 3D Laser-Scanned Data. *Computing in Civil Engineering (2011)*. 2011; 486-493. DOI: 10.1061/41182(416)60
9. Hidayat A.R.T., Prasetya Y.E., Dinanti D. Village Development Index and ICT Infrastructure in Tourism Region. *Journal of Indonesian Tourism and Development Studies*. 2019; 7(3):166-174. DOI: 10.21776/ub.jitode.2019.007.03.05
10. Zhou Y., She J., Huang Y., Li L., Zhang L., Zhang J. A Design for Safety (DFS) Semantic Framework Development Based on Natural Language Processing (NLP) for Automated Compliance Checking Using BIM: The Case of China. *Buildings*. 2022; 12(6):780. DOI: 10.3390/buildings12060780
11. Ding Z., Liu S., Liao L., Zhang L. A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects. *Automation in Construction*. 2019; 102:45-58. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.012
12. Martinez J.G., Albeaino G., Gheisari M., Volkmann W., Alarcón L.F. UAS Point Cloud Accuracy Assessment Using Structure from Motion-Based Photogrammetry and PPK Georeferencing Technique for Building Surveying Applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016; 35(1). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000936
13. Oliveira B.A.S., Neto A.P.D.F., Fernandino R.M.A., Carvalho R.F., Fernandes A.L., Guimaraes F.G. Automated Monitoring of Construction Sites of Electric Power Substations Using Deep Learning. *IEEE Access*. 2021; 9:19195-19207. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3054468
14. Skrzypczak I., Oleniack G., Leśniak A., Zima K., Mrówczyńska M., Kazak J.K. Scan-to-BIM Method in Construction: Assessment of the 3D Buildings Model Accuracy in Terms Inventory Measurements. *Building Research & Information*. 2022; 50(8):859-880. DOI: 10.1080/09613218.2021.2011703
15. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020; 114:103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103-179

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

BIONOTES: Pavel A. Kravchenko — master's degree; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; pavelakrav@gmail.com;

Yulia G. Zheglova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 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: 940377, Scopus: 57202228987, ResearcherID: AAC-8875-2022, ORCID: 0000-0001-8121-8535; JeglovaYUG@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Pavel A. Kravchenko — concept development, methodology development, calculations, visualization, preparing and editing the text, approving the final version.

Yulia G. Zheglova — concept development, methodology development, preparing and editing the text, approving the final version.

The authors declare no conflict of interest.

Организационно-технологические решения строительства
центров обработки данных под нагрузки искусственного
интеллекта: требования, риски, регламенты

Роман Олегович Самсонов, Виктор Станиславович Лоткин
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Быстрый рост обработки нагрузок искусственного интеллекта (ИИ-нагрузки) сместил ключевые ограничения центров обработки данных (ЦОД) с площади и воздушного охлаждения к доступной мощности присоединения, теплосъему и водной инфраструктуре. AI-ready становится свойством строительного проекта: решения о жидкостных/иммерсионных схемах, утилизации тепла, резервировании и программе пусконаладки должны приниматься на ранних стадиях и быть формализованы в проектных параметрах и допусках.

Материалы и методы. Выполнен целенаправленный обзор публикаций с включением рецензируемых статей и профильных стандартов (EN 50600, рекомендации ASHRAE TC 9.9, серия ISO/IEC 30134). Источники проходили тематическое кодирование по темам «охлаждение/теплосъем», «электроснабжение», «вода и экология», «площадка и компоновка», «регламенты и KPI». Анализ осуществлялся как проекция «требование ИИ → строительное решение → проверяемый параметр» с построением матрицы соответствия и схемы «риск → мероприятие → KPI → метод приемки», что позволило увязать литературные данные с практическими инженерными допусками и процедурами испытаний.

Результаты. Целевая архитектура высокоплотных ИИ-кластеров требует принятия жидкостных контуров охлаждения с подготовкой к иммерсии, подтвержденной устойчивости электроснабжения к переходным процессам, постановки водных KPI (WUE) наравне с PUE, а также проектирования интерфейсов утилизации низкопотенциального тепла. Эффективность повышают модульность и блоки заводского производства, каскадный ввод мощностей и применение цифровых двойников. Предложены интегрированная карта рисков и матрица нормативного соответствия, связывающие регламенты с проектными параметрами и приемочными процедурами.

Выводы. «Готовность к ИИ» формируется как результат согласованных организационно-технологических решений строительства. Управленческая рамка, включающая KPI-бюджеты на этапе проектирования, матрицу соответствия требованиям и программу stress-испытаний, обеспечивает воспроизводимость целевых показателей (PUE/WUE/ERE/ERF), управляемость сроков и стоимости и ускоряет достижение проектной вычислительной мощности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центры обработки данных, искусственный интеллект, организационно-технологические решения, жидкостное охлаждение, иммерсионное охлаждение, утилизация тепла, выбор площадки, PUE

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самсонов Р.О., Лоткин В.С. Организационно-технологические решения строительства центров обработки данных под нагрузки искусственного интеллекта: требования, риски, регламенты // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.11

Автор, ответственный за переписку: Виктор Станиславович Лоткин, victorlotkin@yandex.ru.

Organizational and technological solutions for data
centres construction under AI workloads: requirements,
risks, and regulations

Roman O. Samsonov, Victor S. Lotkin
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rapid growth of AI workloads has shifted the key constraints of data centres from floor space and air cooling to available connection power, heat removal capacity, and water infrastructure. AI-ready is becoming an inherent property of building design: decisions regarding liquid/immersion cooling schemes, heat recovery, redundancy, and commissioning programs must be made at early stages and formalized within design specifications and tolerances.

Materials and methods. A targeted review of publications was conducted, incorporating peer-reviewed papers and relevant standards (EN 50600, ASHRAE TC 9.9 guidelines, ISO/IEC 30134 series). Sources were thematically coded under the categories: “cooling/heat removal”, “power supply”, “water and ecology”, “site layout and configuration”, and “regulations and KPI”.

Analysis was performed as a mapping of “AI requirement → building solution → measurable parameter”, resulting in a correspondence matrix and a risk-mitigation framework structured as “risk → mitigation measure → KPI → acceptance method”. This approach effectively linked academic literature with practical engineering tolerances and testing procedures.

Results. The target architecture for high-density AI clusters requires implementation of liquid cooling circuits with readiness for immersion cooling, validated resilience of power supply against transient loads, establishment of water usage effectiveness (WUE) KPI on par with PUE, and design of interfaces for low-grade heat recovery. Efficiency is enhanced through modularity and factory-built modules, staged power ramp-up, and digital twin technologies. An integrated risk map and a regulatory compliance matrix are proposed, explicitly linking standards to design parameters and acceptance procedures.

Conclusions. “AI-readiness” emerges as the outcome of coordinated organizational and technological construction decisions. A management framework encompassing KPI budgets during design phase, a requirements-compliance matrix, and a stress-testing program ensures reproducibility of target metrics (PUE/WUE/ERE/ERF), control over schedule and cost, and accelerated achievement of designed computational capacity.

KEYWORDS: data centres, artificial intelligence, organizational-technological solutions, liquid cooling, immersion cooling, heat recovery, site selection, PUE

FOR CITATION: Samsonov R.O., Lotkin V.S. Organizational and technological solutions for data centres construction under AI workloads: requirements, risks, and regulations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.11

Corresponding author: Victor S. Lotkin, victorlotkin@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное распространение прикладных и генеративных технологий искусственного интеллекта (ИИ) существенно трансформировало требования к центрам обработки данных (ЦОД). В отличие от традиционных вычислительных комплексов, ИИ-кластеры характеризуются высокой плотностью вычислительных нагрузок, повышенной чувствительностью к температурным и электрическим режимам, а также жесткими ограничениями по отказо-устойчивости и масштабируемости. Указанные свойства определяются не только выбором ИТ-оборудования, но, прежде всего, архитектурой и качеством организационно-технологических решений (ОТР) в строительстве на предынвестиционной и проектно-строительной стадиях жизненного цикла (ЖЦ) объекта. Следовательно, способность ЦОД надежно и эффективно обслуживать ИИ-нагрузки является функцией корректно принятых и последовательно реализованных строительных решений.

Ключевой особенностью AI-ready ЦОД выступает изменение ограничивающих факторов. Если при традиционном проектировании доминировали геометрия машинных залов и возможности воздушного охлаждения, то для ИИ-кластера определяющими становятся доступная электрическая мощность присоединения, тепловая нагрузка и требуемые режимы теплосъема. Это предопределяет переход к технологиям жидкостного охлаждения (в том числе direct-to-chip и теплообменные двери заднего типа) и иммерсионным системам, а также к проработке утилизации низкопотенциального тепла посредством тепловых насосов и подключений к системам теплоснабжения. Соответствующие решения имеют прямые строительные последствия: изменяются требования к конструктивным элементам (несущая способность перекрытий, фундаментов, узлов ввода), планировке (технологические высоты, трассировка трубопроводов и шинопроводов), вибро- и шумозащите насосных агрегатов, коррози-

онной стойкости материалов и технологии монтажа контуров охлаждения и водоподготовки.

Выбор площадки и типизация проекта в условиях ИИ-нагрузок приобретают многокритериальный характер, в котором строительная отрасль играет определяющую роль. К числу приоритетных факторов относятся: сроки и условия технологического присоединения к электрическим сетям, доступность и качество водных ресурсов, мезоклиматические параметры (влияющие на режимы свободного и адиабатического охлаждения), природоохранные и градостроительные ограничения, а также геотехнические и гидрогеологические риски. Принятые на этой стадии решения предопределяют целевые показатели эффективности — коэффициент энергоэффективности (PUE), коэффициент водной эффективности (WUE), показатели энергетической повторной утилизации (ERE/ERF) — и критически влияют на показатель time-to-compute, т.е. срок достижения проектной вычислительной мощности. Практика показывает эффективность модульности, использования изделий и блоков заводской готовности, раннего размещения заказов на длиннопериодное оборудование (трансформаторы, распределительные устройства, источник бесперебойного питания (ИБП), теплообменные и насосные группы) и каскадного ввода мощностей.

Организационно-технологический контур строительства ЦОД, ориентированного на ИИ, должен обеспечивать консистентный перевод технологических требований в инженерно-строительные регламенты и процедуры.

Электроснабжение и резервирование. Формирование конфигураций N+1/2N для источников бесперебойного питания и дизель-генераторных установок, обеспечение селективности защиты и качества электроэнергии при наличии мощной силовой электроники, учет гармонических и переходных процессов.

Системы охлаждения и теплосъема. Проектирование жидкостных контуров (включая блоки рас-

пределения охлаждающей жидкости, коллекторные группы и байпасные линии), нормирование параметров теплоносителя (температура, давление, химический состав), обеспечение отказоустойчивости и ремонтпригодности без остановки критических зон, подготовка к применению иммерсионных технологий.

Водоподготовка и экологические режимы. Выполнение объемно-балансовых расчетов, организация систем подготовки и подпитки, соблюдение требований к сбросам и мониторингу водного следа, включение соответствующих мероприятий в разрешительную документацию.

Архитектурно-планировочные решения. Обеспечение несущей способности для высоких точечных нагрузок стоечных рядов и иммерсионных ванн, формирование технологических пространств и шахт для транспортировки крупногабаритного оборудования, разделение «чистых» и «грязных» зон монтажа.

Пусконаладочные работы и ввод. Построение ступенчатых программ термических и электрических испытаний, проведение стресс-тестов, применение цифровых чек-листов и систем трассируемости дефектов, использование информационного моделирования для координации инженерных систем и логистики монтажа.

Содержательное значение имеет нормативно-технический контекст. Международные и национальные стандарты (например, EN 50600 по проектированию и эксплуатации ЦОД; рекомендации ASHRAE TC 9.9 по температурным классам для жидкостного охлаждения; серия ISO/IEC 30134 по ключевым показателям эффективности: PUE, WUE, ERE/ERF) задают рамочные требования к качеству проектных и строительных решений. Для ИИ-нагрузок принципиальна корректная интеграция этих требований в проект: от расчетов энергопотребления и водопользования до сценариев резервирования и обеспечения безопасности на стадии строительства и эксплуатации. В ряде юрисдикций вводятся дополнительные экологические критерии (водный след, уровень шума, требования к утилизации тепла), оказывающие прямое влияние на архитектуру объекта и календарные сроки реализации.

Зависимость ИИ-нагрузок от строительных ОТР носит причинно-следственный характер и проявляется на всех стадиях ЖЦ: от транспортной и ресурсной обеспеченности площадки до ремонтпригодности и модернизируемости инженерной инфраструктуры под последующие поколения аппаратных ускорителей. Для заказчика это выражается в снижении капитальных и эксплуатационных затрат, управляемости рисков и ускорении выхода вычислительных мощностей на рынок.

Современная научная литература последовательно демонстрирует, что экспоненциальный рост нагрузок, обусловленных применением ускорителей

для ИИ, приводит к пересборке базовой инженерной парадигмы ЦОД и переносит акцент с «классических» архитектур на решения, где теплотехника, электроснабжение и водопользование проектируются как взаимосвязанные элементы единого организационно-технологического контура строительства. Наиболее заметным является устойчивый дрейф от воздушного охлаждения к жидкостным и иммерсионным технологиям: обзоры и прикладные исследования фиксируют необходимость прямого отвода тепла с кристалла (direct-to-chip), внедрения теплообменных дверей заднего типа и одно-/двухфазной иммерсии как ответ на рост удельных тепловых нагрузок, а также как средство стабилизации режимов при высоких плотностях ИИ-стоек [1–6]. Показано, что такие схемы не только расширяют допустимые диапазоны эксплуатации, но и создают предпосылки к повторному использованию тепла, что важно для формирования целевых показателей эффективности на стадии предпроектной подготовки и увязки с градо- и природоохранными ограничениями [7, 8].

Параллельно возрастает значимость водного следа и водно-энергетических компромиссов, что напрямую влияет на выбор площадки и компоновку систем охлаждения. Исследования подчеркивают, что величина водопотребления варьирует в широких пределах в зависимости от климатических условий и выбранной технологии (адиабатические, «сухие» и гибридные решения), что требует учитывать метрики водной эффективности наравне с энергетическими [9–11]. В условиях жаркого засушливого климата оптимальные режимы охлаждения неизбежно сопряжены с компромиссами между снижением энергопотребления и ростом водопользования, а потому проектные решения должны включать объемно-балансовые расчеты, системы водоподготовки и подпитки, а также сценарии сезонной перенастройки режимов [10, 11]. Отмечается и влияние профиля рабочих нагрузок: ИИ-задачи, отличаясь по длительности и интенсивности использования ускорителей, формируют иной паттерн тепловыделения и, следовательно, меняют требования к водному контуру и алгоритмам его управления [11, 12].

Существенное внимание уделяется утилизации низкопотенциального тепла ЦОД и его интеграции в системы теплоснабжения. Серия работ показывает как инвестиционную состоятельность таких проектов, так и инженерные предпосылки их успешности: температурные графики сетей, применение тепловых насосов (включая каскадные решения), а также использование циклов органического Ренкина (ORC) для повышения термодинамического потенциала возвратного тепла [13–17]. Конструктивно-планировочные решения при этом должны предусматривать размещение насосно-теплообменных групп, транспортные коридоры для крупногабаритного оборудования, коррозионностойкие материалы и возможность обслуживания без останов-

ки критических зон — требования, которые необходимо закладывать на стадиях концепции и проекта, поскольку они определяют и архитектуру зданий, и календарные планы строительства [15–17].

Выбор площадки для строительства ЦОД, рассчитанных на ИИ-нагрузки, рассматривается как многокритериальная задача, в которой ключевыми становятся доступность и сроки технологического присоединения к электросетям, мезоклиматические характеристики территории, водный стресс, градостроительные и природоохранные режимы, а также геотехнические и гидрогеологические факторы. Показано, что даже внутри сравнительно компактных территорий мезоклимат может оказывать заметное влияние на энергопотребление через потенциально доступные режимы свободного и адиабатического охлаждения, что отражается на совокупной стоимости владения [17]. В городских агломерациях к этому добавляются риски непрерывности бизнеса и особенности локальной регуляторной среды, требующие от девелопера раннего согласования инженерных интерфейсов и логистики строительства [14]. Геопространственные модели пригодности (GIS/MCDA) подтверждают возможность формализованной оценки «окна возможностей» площадки — от близости источников и подстанций до транспортной доступности и санитарно-защитных зон — и служат основой для обоснования организационно-технологических решений уже на предынвестиционной фазе [18–23].

Отдельный пласт исследований посвящен взаимодействию ЦОД с энергосистемой в условиях высоких и динамичных нагрузок, свойственных ИИ-кластеру. Представлены модели распределения мощности и эмуляторы, учитывающие работу мощной силовой электроники (ИБП, выпрямители, преобразователи) и переходные процессы, что позволяет планировать конфигурации резервирования ($N+1/2N$), обеспечивать селективность защиты и качество электроэнергии на шинах критической нагрузки [19–20]. Для строительной практики это означает необходимость корректного задания трасс и сечений шинопроводов, параметров заземления и оперативной надежности распределительного устройства (РУ), а также включения в программы пусконаладочных работ сценариев, имитирующих реальные профили ИИ-нагрузок и сопутствующие гармонические искажения.

Интенсивно развивается направление алгоритмического управления охлаждением и сопутствующей метрологией эффективности. Систематизации стратегий оптимизационного управления, предложенные в профильной литературе, опираются на расширенные наборы метрик, включающие не только традиционные показатели энергетической эффективности, но и индикаторы повторного использования энергии и водной эффективности; подчеркивается важность настройки систем автоматизации и датчиковых подсистем под климатические и техно-

логические сценарии конкретной площадки [21, 22]. Это подтверждает тезис о необходимости «инженерной управляемости» проектируемых систем с момента закладки их в строительную документацию, включая требования к резервированию, байпасированию и секционированию коллекторов для поддержания ремонтпригодности без деградации вычислительной готовности объекта.

Наконец, на уровне узлов и компоновки демонстрируется потенциал инженерных инноваций, направленных на снижение суммарного термического сопротивления между источниками тепла и контуром его отвода: от конструкций с теплоотводящими «спинками» до оптимизации гидравлических режимов и контактных поверхностей в блоках распределения охлаждающей жидкости [8]. В сочетании с практикой внедрения direct-to-chip и иммерсионных решений это подводит к важному организационно-технологическому выводу: архитектура AI-ready ЦОД требует не только выбора принципиальной схемы охлаждения и электроснабжения, но и проектирования маршрутов монтажа, секций для обслуживания, а также широкого применения модульности и изделий заводской готовности в составе МЕР-подсистем (Mechanical, Electrical, and Plumbing) для снижения рисков пусконаладки и сокращения времени до ввода расчетных вычислительных мощностей [3, 4, 6, 7].

Суммарно проанализированное поле источников позволяет заключить, что «готовность к ИИ» является интегральной характеристикой строительного проекта ЦОД, возникающей из согласованности решений по теплотехнике, электроснабжению, водопользованию и тепловой интеграции с городской инфраструктурой. Научные результаты последних лет предоставляют методическую основу для перевода технологических требований ИИ в инженерно-строительные регламенты и календарные планы: через ранний многокритериальный выбор площадки, нормирование целевых показателей эффективности, формирование программ испытаний и эксплуатационных режимов, а также закрепление модульности и префабрикации как базовых организационно-технологических принципов реализации проекта [1–23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научная работа носит комплексный подход и опирается на данные в формате конвергентного аналитического обзора с нормативной верификацией и проектно-технологической декомпозицией. В исследовании рассматривались научные работы, содержащие инженерные параметры и методики расчета, а также документы стандартов и руководства, релевантные строительным решениям. Исключались работы сугубо информационно-технологического профиля без инфраструктурной компоненты,

непроверяемые обзоры и дублирующие публикации.

Из каждого источника извлекались характеристики контекста:

- климат;
- технология;
- количественные показатели (тепловые/гидравлические/электрические параметры).

Далее проводилось тематическое кодирование по пяти критериям:

1. Охлаждение и теплосъем.
2. Электроснабжение и качество электроэнергии.
3. Водопользование и экологические ограничения.
4. Выбор площадки, компоновка и логистика.
5. Регуляtorика и метрики эффективности.

Синтез осуществлялся через логико-структурное сопоставление «требование ИИ → строительное решение → проверяемый параметр», с построением схемы «риск → мероприятие → KPI → метод приемки» и матрицы соответствия стандартам.

Верификация заключалась в перекрестной проверке выводов по независимым источникам и в согласовании проектных параметров с нормируемыми допусками и процедурами испытаний, описанными в стандартах. Ограничения подхода связаны с ограниченной доступностью полноформатных эксплуатационных данных по иммерсионным системам, неоднородностью описаний решений и вариативностью национальной нормативной базы. Тем не менее выбранная методика обеспечивает воспроизводимую трассируемость от литературных данных к формализованным строительным решениям и контрольным процедурам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ подтверждает, что «готовность к ИИ» является не производной от выбора серверов и ускорителей, а интегральным свойством строительного проекта ЦОД. На практике профиль требований формируется задолго до поставки ИТ-оборудования — через решения о схеме теплосъема и электроснабжения, водной инфраструктуре, компоновке, резервировании и сценариях пусконаладочных работ. Сопоставление выявленных в литературе тенденций с реализуемыми проектами показывает разрыв между текущей практикой и целевой моделью: многие объекты все еще проектируются в парадигме «воздух по умолчанию» с поздним добавлением жидкостных контуров и локальных усилений по электропитанию, тогда как требуемая для ИИ архитектура должна предполагать жидкостное охлаждение как базовую предпосылку и учитывать динамику мощной силовой электроники уже на концептуальной стадии.

В части требований наибольшее расхождение наблюдается в области теплосъема и электрообеспе-

чения. Распространенная практика — корректировка схем охлаждения на стадии рабочей документации (РД) или даже в процессе строительства — ограничивает компоновку, повышает нагрузку на конструктив и усложняет сервис. Целевая конфигурация, напротив, требует раннего решения в пользу direct-to-chip и/или иммерсионных схем с резервированием по секциям, с предусмотренными коллекторными группами, байпасированием, местами под CDU (Coolant Distribution Unit) и тепловыми насосами, а также с возможностью безостановочного обслуживания. Электроснабжение должно проектироваться не только с резервированием N+1/2N, но и с подтвержденной устойчивостью к переходным процессам и гармоническим искажениям, характерным для ИИ-кластеров; это требует расчетов и полевых испытаний, имитирующих реальные профили нагрузок. Водно-химические параметры теплоносителя и водный баланс — самостоятельные ограничители: проект обязан содержать объемно-балансовые расчеты, требования к качеству воды, сезонные режимы и сценарии подпитки, а также предусматривать утилизацию низкопотенциального тепла как часть проектного задания, а не факультативную опцию. Организационно-технологически означает приоритизацию модульности и изделий заводской готовности (prefab) в МЕР-подсистемах, каскадный ввод мощностей и цифровые управляемые пусконаладочные работы (ПНР) с термическими и электрическими стресс-прогонами.

Профиль рисков подтверждает необходимость перехода от разрозненного управления к интегрированной карте рисков. Традиционно энергетические риски закрываются резервированием и «запасами» по мощности, теплотехнические — завышением производительности охладителей, водные — локальными резервуарами, а регуляторные — корректировками на стадии экспертизы. Такой подход не обеспечивает воспроизводимости результатов в ИИ-кластерах. Целевая практика должна связывать каждый риск с конкретным проектным мероприятием, измеримым показателем и методикой приемочного испытания: для электроснабжения — подтверждение селективности и качества электроэнергии при «ИИ-профилях»; для теплотехники — секционирование и гидравлическое развязывание контуров с возможностью изолированного обслуживания, вибро- и шумозащита насосных станций, контроль коррозии и чистоты теплообменных поверхностей; для водопользования — сценарный баланс с KPI WUE, технологические схемы подготовки и дозирования; для площадки — GIS/MCDA-оценка мезоклимата, гидрогеологии и природных опасностей с переносом ограничений в планировочные решения и календарные графики. Результативность такого подхода возрастает при использовании цифрового двойника строительства, обеспечивающего трассируемость от исходных ограничений до актов ПНР.

Матрица нормативного соответствия

Требование/источник	Проектный параметр/ раздел	Целевое значение/ допуск	Метод проверки/ испытания	Критерий приемки	Ответственный	Стадия
EN 50600 (класс доступности, электроснабжение)	Резервирование ИБП/дизель-генераторной установки (ДГУ), конфигурация шинопроводов и РУ	Архитектура N+1 или 2N; класс доступности — целевой (установить в техническом задании (ТЗ))	FAT (Factory Acceptance Test)/ SAT (Site Acceptance Test) ИБП/ДГУ; IST (Intelligent Stress Testing) с имитацией ИИ-профиля нагрузки	Работа в целевом классе без потери нагрузки при отказе одного элемента	Генпроектировщик, подрядчик МЕР, ПНР-организация	Проектирование (П), рабочая документация (РД), ПНР
ASHRAE TC 9.9 (жидкостное/иммерсионное охлаждение)	Температура/давление/качество теплоносителя, узлы CDU/коллекторы	Температурный класс систем; допуски по давлению и химсоставу (по ТЗ)	Гидроиспытания; термостресс-прогон с имитацией тепловыделения	Поддержание параметров в допусках при $\geq 75\%$ ИТ-нагрузки без утечек	Подрядчик МЕР, ПНР-организация	РД, строительство, ПНР
ISO/IEC 30134-2 (PUE)	Энергоэффективность по подсистемам (охлаждение, распределение)	Проектный бюджет PUE (целевое значение — установить)	IST; замер мощности ИТ и вспомогательных систем при стабильной нагрузке	Расчетный/измеренный PUE $\leq$ проектного бюджета	Генпроектировщик, эксплуатация, ПНР	П, РД, ПНР, ввод
ISO/IEC 30134-9 (WUE)	Водный баланс (подпитка, испарение, продувка, сброс)	Проектный бюджет WUE (целевое значение — установить)	Балансовые измерения; журналы подпитки/сбросов; сезонные режимы	Измеренный WUE $\leq$ проектного бюджета при заданных условиях	Генпроектировщик, эколог, эксплуатация	П, РД, ПНР, ввод
ISO/IEC 30134-6/7 (ERE/ERF — повторное использование энергии)	Интерфейсы утилизации тепла: тепловой насос (ТН)/теплогенератор (ТГ)/охладитель (О), подключение к тепловой сети (ТС)/центральному тепловому пункту (ЦТП)	Проектные бюджеты ERE/ERF (целевые значения — установить)	Тепловой баланс; нагрузочные испытания тепловых насосов/обменников	Достижение целевых ERE/ERF в расчетных режимах	Подрядчик МЕР, генпроектировщик, теплосеть	П, РД, ПНР
Качество электроэнергии (ГОСТ/IEC, требования сетевой организации)	Параметры качества: THD (Total Harmonic Distortion), просадки/перенапряжения, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтров	В пределах норм ГОСТ/IEC и условий технологического присоединения (ТП)	Измерения логгерами PQ (Performance Qualification) в IST (Intelligent Stress Testing) с «ИИ-профилями» нагрузки	Показатели PQ в допусках при номинальной/переходной работе	Электроподрядчик, ПНР, сетевая организация	РД, ПНР, ввод
Экологические нормы (шум, сбросы, водопользование)	Акустика насосных/ДГУ; параметры сброса; водопользование	Градостроительные и природоохранные лимиты (по разрешительной документации)	Акустические замеры; протоколы водоанализа; журналы баланса	Соответствие лимитам и условиям спецразрешений	Эколог, подрядчик МЕР, генподрядчик	П, РД, ПНР, ввод
Выбор площадки (GIS/MCDA, градостроительные регламенты)	Энергетическая/водная обеспеченность, мезоклимат, логистика	Минимальные пороги пригодности (по матрице весов MCDA)	Отчет GIS/MCDA; согласования с сетями; текущие условия	Достижение порогов и наличие технических условий (ТУ)/согласований	Девелопер, генпроектировщик	Предынвестиционная, П

Регуляторная составляющая остается критически важной и в значительной степени определяет исполнимость проектных решений. Наблюдается тенденция формального упоминания EN 50600, рекомендаций ASHRAE TC 9.9 и метрик ISO/IEC 30134 (PUE, WUE, ERE/ERF) без их прямой трансляции в параметры проекта, допуски, спецификации материалов и процедуры испытаний. Доказательная практика требует иного: матрицы соответствия, в которой каждое требование стандарта связано с конкретным параметром раздела «Проект», контролируемым допуском, методикой проверки и документом приемки. Внутри этой матрицы KPI перестают быть «эксплуатационными отчетными цифрами» и становятся проектными бюджетами, распределенными по системам: допускаемая гидравлическая потеря на участок, тепловой бюджет на узел, классы доступности и режимы резервирования на электрических шинах. Экологические критерии — шум, сбросы, тепловой след — переносятся в разряд проектных ограничений, влияющих на компоновку, материалы и сроки.

Прогноз на ближайшие пять лет указывает на консолидацию жидкостных и иммерсионных технологий как отраслевого стандарта для высокоплотных ИИ-нагрузок и на формирование совместимых интерфейсов узлов (коллекторы, фитинги, материалы), что упростит проектирование и монтаж. Водные и тепловые показатели эффективности будут институционализированы в заданиях на проектирование, а утилизация тепла становится условием согласований в городских и кампусных проектах. Масштабы префабрикации возрастут, что сократит time-to-compute и снизит риски ПНР; цифровые двойники строительства станут нормой для управления соответствием и рисками. Ожидается ужесточение экологических требований и смещение географии проектов в пользу территорий с благоприятным мезоклиматом, доступной мощностью присоединения и водными ресурсами; параллельно усилятся запрос сетевых организаций на предиктивные модели спроса и полевые испытания с «ИИ-профилями» нагрузки. В совокупности это закрепит за строительной отраслью роль координатора, превращающего инженерные и регуляторные требования в реализуемые компоновочные и технологические решения.

Суммируя, результаты исследования демонстрируют, что достижение целевых показателей ИИ-ЦОД — по плотности, энерго- и водной эффективности, ремонтопригодности и срокам ввода — определяется качеством организационно-технологической модели строительства. Эффективная модель включает ранний выбор и «запирание» схем охлаждения и утилизации тепла с отражением в конструктиве, формализованную карту рисков и матрицу нормативного соответствия, бюджеты KPI на этапе проектирования, план префабрикации и каскадного ввода мощностей, а также программу ПНР, воспроиз-

изводящую реальные режимы ИИ-нагрузок. Такое построение обеспечивает причинно-следственную связь между решениями на площадке и эксплуатационной готовностью ЦОД, снижает совокупный риск и ускоряет достижение проектной вычислительной мощности. В рамках исследования была сформирована матрица, представленная в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило исходный тезис о том, что «готовность к ИИ» является интегральным свойством строительного проекта ЦОД и формируется на стадии организационно-технологических решений. Сопоставление современных разработок по теплотехнике, электроснабжению, водопользованию и тепловой интеграции с практикой проектирования и строительства показывает: устойчивое и эффективное размещение высокоплотных ИИ-кластеров определяется не выбором вычислительных стоек, а согласованностью решений по выбору площадки, архитектурно-планировочной компоновке, конфигурации систем охлаждения и электропитания, организации пусконаладочных работ и управлению жизненным циклом.

С точки зрения требований целевая архитектура AI-ready предполагает принятие жидкостного охлаждения как решения «по умолчанию» с заранее предусмотренной эволюцией к иммерсионным технологиям, подтвержденную устойчивость электропитания к переходным процессам и гармоническим искажениям, а также полноценную постановку водных и тепловых KPI наравне с энергетическими. Концепция строительства должна включать утилизацию низкопотенциального тепла и интерфейсы с внешними тепловыми сетями, модульность и префабрикацию MEP-подсистем, каскадный ввод мощностей и программируемые стресс-испытания, воспроизводящие профиль ИИ-нагрузок. В такой постановке строительные решения приобретают статус первичных детерминант эксплуатационных показателей — от PUE/WUE/ERE до ремонтопригодности.

Анализ рисков показал ограниченность разрозненных подходов и необходимость перехода к единой управленческой схеме, где каждому риску сопоставлены проектное мероприятие, измеримый показатель и процедура приемочного контроля. Практическим инструментом выступает «карта рисков» и связанная с ней матрица нормативного соответствия, обеспечивающие трассируемость от исходных ограничений площадки и сетевой инфраструктуры до актов ПНР. Включение GIS/MCDA-оценки мезоклимата, гидрогеологии и регуляторных режимов на предынвестиционной стадии позволяет транслировать внешние ограничения в планировочные решения и календарные графики, снижая вероятность поздних изменений и технологических коллизий.

Регуляторный контур требует операционализации: международные руководства (EN 50600, ре-

комендации ASHRAE TC 9.9, серия ISO/IEC 30134) должны переводиться из декларативных ссылок в проектные параметры с явными допусками, методиками испытаний и критериями приемки. Экологические требования — шум, сбросы, водный след, повторное использование энергии — целесообразно закреплять на уровне исходно-разрешительной документации, чтобы их влияние на компоновку, материалы и сроки было учтено до заключения контрактов поставки длинноциклового оборудования. Такая институционализация делает проверяемыми как целевые KPI, так и предельные условия эксплуатации для высокоплотных ИИ-кластеров.

Ожидаемые отраслевые тенденции на горизонте ближайших пяти лет указывают на консолидацию жидкостных и иммерсионных технологий, рост доли изделий заводской готовности, повсеместное внедрение цифровых двойников строительства и эксплуатации, институционализацию водных и тепловых показателей эффективности и расширение практик полезного использования тепла. Параллельно усилится интеграция ЦОД с энергосистемой посредством предиктивного планирования нагрузок и полевых испытаний, а география проектов сместится в пользу площадок с благоприятным мезоклиматом, доступной мощностью присоединения и устойчивыми водными ресурсами. Эти сдвиги

закрепят за строительной отраслью роль координатора, обеспечивающего согласование инженерных, экологических и регуляторных требований в реализуемые компоновочные и технологические решения.

Ограничения исследования связаны с ограниченным объемом открытых эксплуатационных данных по длительной работе иммерсионных систем, неоднородностью нормативной базы в разных юрисдикциях и быстрым технологическим циклом аппаратных ускорителей. Дальнейшие исследования видятся в стандартизации узлов и интерфейсов жидкостных и иммерсионных систем на строительном уровне, в разработке унифицированных программ стресс-испытаний с типовыми «ИИ-профилями», в ко-оптимизации энерго- и водной эффективности с учетом мезоклимата и в накоплении эмпирики по экономике утилизации тепла в различных городских и кампусных сценариях.

В совокупности полученные результаты формируют целостную организационно-технологическую рамку проектирования и строительства AI-ready ЦОД. Ее применение позволяет уменьшить совокупный риск, обеспечить воспроизводимость требуемых эксплуатационных показателей и ускорить достижение проектной вычислительной мощности, а значит — превратить ИИ-требования из источника ограничений в управляемые параметры строительного решения.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Роман Олегович Самсонов — доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории организационно-технологических систем использования искусственного интеллекта в строительстве (ОТС); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SamsonovRO@mgsu.ru;

Виктор Станиславович Лоткин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; victorlotkin@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The rapid spread of applied and generative artificial intelligence (AI) technologies has significantly transformed the requirements for data centres. Unlike traditional computing complexes, AI clusters are characterized by high computing load density, increased sensitivity to temperature and electrical conditions, and strict requirements for fault tolerance and scalability. These properties are determined not only by the choice of IT equipment, but above all by the architecture and quality of organizational and technological solutions in

construction (OTS) at the pre-investment and design and construction stages of the facility's life cycle (LC). Consequently, the ability of a data centre to reliably and efficiently serve AI loads is a function of correctly adopted and consistently implemented construction solutions.

A key feature of AI-ready data centres is the change in limiting factors. While traditional design was dominated by the geometry of machine rooms and air-cooling capabilities, for AI clusters, the available electrical connection power, thermal load and required heat removal modes become decisive. This predetermines the transition to liquid cooling technologies (including direct-to-chip and

rear-type heat exchange doors) and immersion systems, as well as the development of low-potential heat utilization through heat pumps and connections to heat supply systems. The corresponding solutions have direct construction implications: requirements for structural elements (load-bearing capacity of floors, foundations, input nodes), layout (technological heights, piping and busbar routing), vibration and noise protection for pump units, corrosion resistance of materials, and installation technology for cooling and water treatment circuits.

The selection of a site and the standardization of a project under AI loads are becoming multi-criteria in nature, with the construction industry playing a decisive role. Priority factors include: terms and conditions for technological connection to electrical grids, availability and quality of water resources, mesoclimatic parameters (affecting free and adiabatic cooling modes), environmental and urban planning restrictions, as well as geotechnical and hydrogeological risks. The decisions made at this stage determine the target efficiency indicators — power usage effectiveness (PUE), water usage efficiency (WUE), energy reuse (ERE/ERF) indicators — and critically affect the time-to-compute indicator, i.e. the time required to achieve the design computing power. Practice shows the effectiveness of modularity, the use of factory-ready products and units, early ordering of long-cycle equipment (transformers, switchgear, UPS, heat exchange and pump units) and cascaded power input.

The organizational and technological framework for the construction of an AI-oriented data centre must ensure the consistent translation of technological requirements into engineering and construction regulations and procedures.

Power supply and backup. Formation of N+1/2N configurations for uninterruptible power supplies and diesel generator sets, ensuring selectivity of protection and power quality in the presence of powerful power electronics, taking into account harmonics and transient processes.

Cooling and heat removal systems. Design of liquid circuits (including coolant distribution units, manifold groups and bypass lines), standardization of heat transfer fluid parameters (temperature, pressure, chemical composition), ensuring fault tolerance and maintainability without stopping critical areas, preparation for the use of immersion technologies.

Water treatment and environmental modes. Performing volume balance calculations, organizing treatment and feed systems, complying with discharge and water footprint monitoring requirements, and including relevant measures in the permitting documentation.

Architectural and planning solutions. Ensuring load-bearing capacity for high point loads of rack rows and immersion baths, forming technological spaces and shafts for transporting large-sized equipment, separating “clean” and “dirty” installation areas.

Commissioning and start-up. Development of step-by-step thermal and electrical testing programmes,

stress testing, use of digital checklists and defect traceability systems, use of information modelling to coordinate engineering systems and installation logistics.

The regulatory and technical context is of significant importance. International and national standards (e.g., EN 50600 on the design and operation of data centres; ASHRAE TC 9.9 recommendations on temperature classes for liquid cooling; ISO/IEC 30134 series on key performance indicators: PUE, WUE, ERE/ERF) set out the framework requirements for the quality of design and construction solutions. For AI loads, it is essential that these requirements are correctly integrated into the design: from energy consumption and water use calculations to redundancy and security scenarios during construction and operation. A number of jurisdictions are introducing additional environmental criteria (water footprint, noise levels, heat utilization requirements) that have a direct impact on the architecture of the facility and the implementation schedule.

The dependence of AI loads on construction OTS solutions is causal in nature and manifests itself at all stages of the life cycle: from transport and resource provision for the site to the maintainability and upgradeability of the engineering infrastructure for subsequent generations of hardware accelerators. For the customer, this translates into lower capital and operating costs, risk management, and accelerated market entry for computing power.

Contemporary scientific literature consistently demonstrates that the exponential growth in loads caused by the use of accelerators for AI is leading to a rethinking of the basic engineering paradigm of data centres and shifting the focus from “classical” architectures to solutions where heating, power supply and water use are designed as interconnected elements of a single organizational and technological construction circuit. The most noticeable trend is a steady shift from air cooling to liquid and immersion technologies: reviews and applied research highlight the need for direct-to-chip heat removal, the introduction of rear-type heat exchange doors and single/two-phase immersion as a response to the growth in specific heat loads, as well as a means of stabilizing operating modes at high AI rack densities [1–6]. It has been shown that such schemes not only expand the permissible operating ranges, but also create the conditions for heat reuse, which is important for setting performance targets at the pre-design stage and coordinating with urban and environmental restrictions [7, 8].

At the same time, the importance of water footprint and water-energy trade-offs is increasing, which directly affects the choice of site and the layout of cooling systems. Studies emphasize that water consumption varies widely depending on climatic conditions and the technology chosen (adiabatic, “dry” and hybrid solutions), which requires water efficiency metrics to be taken into account alongside energy metrics [9–11]. In hot, arid climates, optimal cooling modes inevitably

involve compromises between reducing energy consumption and increasing water use, and therefore design solutions must include volume balance calculations, water treatment and replenishment systems, as well as scenarios for seasonal mode adjustments [10, 11]. The influence of the workload profile is also noted: AI tasks, differing in the duration and intensity of accelerator use, form a different heat dissipation pattern and, consequently, change the requirements for the water circuit and its control algorithms [11, 12].

Significant attention is paid to the utilization of low-potential heat from data centres and its integration into heating systems. A series of studies demonstrates both the investment viability of such projects and the engineering prerequisites for their success: temperature graphs of networks, the use of heat pumps (including cascade solutions), and the use of organic Rankine cycles (ORC) to increase the thermodynamic potential of return heat [13–17]. Design and planning solutions must provide for the placement of pump-heat exchange units, transport corridors for large-sized equipment, corrosion-resistant materials, and the possibility of servicing critical areas without shutdown — requirements that must be laid down at the concept and design stages, as they determine both the architecture of buildings and construction schedules [15–17].

The selection of a site for the construction of data centres designed for AI loads is considered a multi-criteria task, in which the key factors are the availability and timing of technological connection to power grids, mesoclimate characteristics of the territory, water stress, urban planning and environmental protection regimes, as well as geotechnical and hydrogeological factors. It has been shown that even within relatively compact areas, the mesoclimate can have a significant impact on energy consumption through potentially available free and adiabatic cooling modes, which affects the total cost of ownership [17]. In urban agglomerations, this is compounded by business continuity risks and the peculiarities of the local regulatory environment, which require developers to agree on engineering interfaces and construction logistics at an early stage [14]. Geospatial suitability models (GIS/MCDA) confirm the possibility of a formalized assessment of a site's "window of opportunity" — from proximity to sources and substations to transport accessibility and sanitary protection zones — and serve as the basis for justifying OTS decisions as early as the pre-investment phase [18–23].

A separate area of research is devoted to the interaction of data centres with the power grid under high and dynamic loads characteristic of AI clusters. Power distribution models and emulators are presented that take into account the operation of powerful power electronics (UPS, rectifiers, converters) and transient processes, which allows planning backup configurations ($N+1/2N$), ensuring selective protection and power quality on critical load buses [19, 20]. For construction practice, this means the need to correctly specify busbar routes and

cross-sections, grounding parameters and operational reliability of switchgear, as well as to include scenarios in commissioning programmes that simulate real AI load profiles and associated harmonic distortions.

The field of algorithmic cooling control and related efficiency metrology is developing rapidly. The systematization of optimization control strategies proposed in the relevant literature is based on extended sets of metrics that include not only traditional energy efficiency indicators, but also indicators of energy reuse and water efficiency. The importance of configuring automation systems and sensor subsystems for the climatic and technological scenarios of a specific site is emphasized [21, 22]. This confirms the thesis of the need for "engineering controllability" of the designed systems from the moment they are included in the construction documentation, including requirements for redundancy, bypassing and sectioning of manifolds to maintain maintainability without degrading the computational readiness of the facility.

Finally, at the node and layout level, the potential of engineering innovations aimed at reducing the total thermal resistance between heat sources and the heat removal circuit is demonstrated: from designs with heat-dissipating "backs" to the optimization of hydraulic modes and contact surfaces in coolant distribution blocks [8]. Combined with the practice of implementing direct-to-chip and immersion solutions, this leads to an important organizational and technological conclusion: AI-ready data centre architecture requires not only the selection of a basic cooling and power supply scheme, but also the design of installation routes, maintenance sections, and the widespread use of modularity and factory-ready products in MEP subsystems to reduce commissioning risks and shorten the time to achieve design computing power [3, 4, 6, 7].

A comprehensive analysis of the sources allows us to conclude that "AI readiness" is an integral characteristic of a data centre construction project, arising from the coordination of decisions on heating, power supply, water use and thermal integration with urban infrastructure. Scientific results from recent years provide a methodological basis for translating AI technological requirements into engineering and construction regulations and schedules: through early multi-criteria site selection, standardization of target performance indicators, development of testing programmes and operating modes, and the establishment of modularity and prefabrication as basic organizational and technological principles for project implementation [1–23].

MATERIALS AND METHODS

The scientific work takes a comprehensive approach and is based on data in the format of a convergent analytical review with normative verification and design and technological decomposition. The study considered scientific works containing engineering parameters and calculation methods, as well as standard documents and

guidelines relevant to construction solutions. Works of a purely informational and technological nature without an infrastructure component, unverifiable reviews and duplicate publications were excluded.

Contextual characteristics were extracted from each source:

- climate;
- technology;
- quantitative indicators (thermal/hydraulic/electrical parameters).

Thematic coding was then carried out according to five criteria:

1. Cooling and heat removal.
2. Power supply and power quality.
3. Water use and environmental constraints.
4. Site selection, layout and logistics.
5. Regulations and performance metrics.

The synthesis was carried out through a logical and structural comparison of “AI requirement → construction solution → verifiable parameter”, with the creation of a “risk → measure → KPI → acceptance method” diagram and a standards compliance matrix.

Verification consisted of cross-checking conclusions against independent sources and aligning design parameters with the standardized tolerances and testing procedures described in the standards. The limitations of the approach are related to the limited availability of full-format operational data on immersion systems, the heterogeneity of solution descriptions, and the variability of the national regulatory framework. Nevertheless, the chosen methodology provides reproducible traceability from literature data to formalized construction solutions and control procedures.

RESEARCH RESULTS

The analysis confirms that “AI readiness” is not derived from the choice of servers and accelerators, but is an integral property of the data centre construction project. In practice, the requirements profile is formed long before the IT equipment is delivered — through decisions on heat removal and power supply schemes, water infrastructure, layout, redundancy, and commissioning scenarios. A comparison of the trends identified in the literature with actual projects reveals a gap between current practice and the target model: many facilities are still designed in the “air by default” paradigm with the late addition of liquid circuits and local power supply amplifications, whereas the architecture required for AI should assume liquid cooling as a basic prerequisite and take into account the dynamics of powerful power electronics already at the conceptual stage.

In terms of requirements, the greatest discrepancy is observed in the areas of heat removal and power supply. The common practice of adjusting cooling schemes at the design stage or even during construction limits the layout, increases the load on the structure, and complicates servicing. The target configuration, on the contrary, requires an early decision in favour of direct-to-chip and/or immersion circuits with sec-

tional redundancy, with provision for collector groups, bypassing, space for CDU and heat pumps, as well as the possibility of non-stop maintenance. The power supply must be designed not only with N+1/2N redundancy, but also with proven resistance to transient processes and harmonic distortions characteristic of AI clusters; this requires calculations and field tests simulating real load profiles. The water-chemical parameters of the coolant and the water balance are independent constraints: the design must include volume balance calculations, water quality requirements, seasonal modes and make-up scenarios, and provide for the utilization of low-potential heat as part of the design brief, rather than an optional extra. In organizational and technological terms, this means prioritizing modularity and prefabricated products in MEP subsystems, cascaded commissioning of capacities, and digitally controlled CW with thermal and electrical stress tests.

The risk profile confirms the need to move from fragmented management to an integrated risk map. Traditionally, energy risks are covered by reserves and capacity “stocks”, thermal risks by overestimating the performance of coolers, water risks by local reservoirs, and regulatory risks by adjustments at the examination stage. This approach does not ensure the reproducibility of results in AI clusters. Target practice should link each risk to a specific project activity, a measurable indicator, and an acceptance test methodology: for power supply — confirmation of the selectivity and quality of electricity in “AI profiles”; for heating engineering — sectioning and hydraulic decoupling of circuits with the possibility of isolated maintenance, vibration and noise protection of pumps, corrosion and cleanliness control of heat exchange surfaces; for water use — scenario balance with KPI WUE, technological schemes for preparation and dosing; for the site — GIS/MCDA assessment of mesoclimate, hydrogeology and natural hazards with the transfer of restrictions to planning decisions and schedules. The effectiveness of this approach increases when using a digital twin of the construction, which ensures traceability from the initial restrictions to the CW acts.

The regulatory component remains critically important and largely determines the feasibility of design solutions. There is a tendency to formally mention EN 50600, ASHRAE TC 9.9 recommendations, and ISO/IEC 30134 metrics (PUE, WUE, ERE/ERF) without directly translating them into project parameters, tolerances, material specifications, and testing procedures. Proven practice requires something else: a compliance matrix in which each standard requirement is linked to a specific parameter in the “Project” section, a controlled tolerance, a verification method, and an acceptance document. Within this matrix, KPI cease to be “operational reporting figures” and become project budgets distributed across systems: permissible hydraulic loss per section, thermal budget per node, availability classes and redundancy modes on electrical buses. Environmental criteria — noise, emissions, thermal

Regulatory compliance matrix

Requirement/source	Design parameter/section	Target value/tolerance	Verification/testing method	Acceptance criterion	Responsible	Stage
EN 50600 (accessibility class, power supply)	UPS/DGS reservation, busbar configuration and SG	N+1 or 2N architecture; availability class — target (to be specified in technical specifications)	FAT (Factory Acceptance Test)/ SAT (Site Acceptance Test) UPS/DGS; IST (Intelligent Stress Testing) with AI load profile simulation	Working in a target class without loss of load when one element fails	General designer, MEP contractor, CW organization	Planning (P), WD, CW
ASHRAE TC 9.9 (liquid/immersion cooling)	Temperature/pressure/quality of heat transfer fluid, CDU units/collectors	Temperature class of systems; tolerances for pressure and chemical composition (according to technical specifications)	Hydrostatic testing; thermal stress run with simulated heat release	Maintaining parameters within tolerances at ≥ 75 % IT load without leaks	MEP contractor, CW organization	WD, Construction, CW
ISO/IEC 30134-2 (PUE)	Energy efficiency by subsystem (cooling, distribution)	Project budget PUE (target value — to be set)	IST; measurement of IT and auxiliary systems power consumption under stable load	Estimated/measured PUE $\leq$ design budget	Chief designer, operation, CW	P, WD, CW, input
ISO/IEC 30134-9 (WUE)	Water balance (replenishment, evaporation, blowdown, discharge)	WUE project budget (target value — to be set)	Balance measurements; feed/discharge logs; seasonal modes	Measured WUE $\leq$ design budget under specified conditions	Chief designer, environmentalist, operations	P, WD, CW, input
ISO/IEC 30134 6/7 (ERE/ERF — energy reuse)	Heat utilization interfaces heat pump (HP)/heat exchanger (HE)/cooler (C), connection to the Heating network (HN)/central heating substation (CHS)	ERE/ERF project budgets (target values — to be set)	Heat balance; load testing of heat pumps/exchangers	Achievement of target ERE/ERF in design modes	MEP contractor, general designer, heating network	P, WD, CW
Power quality (GOST/IEC, network organization requirements)	Quality parameters: THD (Total Harmonic Distortion), sag/overvoltage, amplitude-frequency response (AFR) of filters	Within the limits of GOST/IEC standards and connection conditions (TC)	Measurements by PQ loggers in IST with load “AI profiles”	PQ indicators within tolerances at nominal/transient operation	Electrical contractor, CW, network organization	WD, CW, input
Environmental standards (noise, discharges, water use)	Acoustics of pumps/diesel generator sets; discharge parameters; water use	Urban and nature conservation limits (according to permits)	Acoustic measurements; water analysis reports; balance logs	Compliance with limits and conditions of special permits	Environmentalist, MEP contractor, general contractor	P, WD, CW, input
Site selection (GIS/MCDA, urban planning regulations)	Energy/water supply, mesoclimate, logistics	Minimum suitability thresholds (based on the MCDA weight matrix)	GIS/MCDA report; network approvals; technical conditions	Achievement of thresholds and availability of technical specifications (TS)/agreements	Developer, general designer	Pre-investment, P

footprint — are transferred to the category of design constraints that affect layout, materials, and deadlines.

The forecast for the next five years points to the consolidation of liquid and immersion technologies as the industry standard for high-density AI loads and the formation of compatible node interfaces (manifolds, fittings, materials), which will simplify design and installation. Water and thermal efficiency metrics will be institutionalized in design specifications, and heat recovery will become a condition for approval in urban and campus projects. The scale of prefabrication will increase, reducing time-to-compute and mitigating CW risks; digital twins of construction will become the norm for compliance and risk management. Environmental requirements are expected to become more stringent and the geography of projects will shift in favour of areas with a favourable mesoclimate, accessible connection capacity and water resources; at the same time, network organizations will increase their demand for predictive demand models and field tests with AI load profiles. Taken together, this will cement the construction industry's role as a coordinator, transforming engineering and regulatory requirements into feasible layout and technological solutions.

In summary, the results of the study demonstrate that achieving the target indicators for AI-data centres — in terms of density, energy and water efficiency, maintainability and commissioning times — is determined by the quality of the organizational and technological model of construction. An effective model includes early selection and “locking in” of cooling and heat recovery schemes reflected in the design, a formalized risk map and regulatory compliance matrix, KPI budgets at the design stage, a prefabrication and cascading capacity commissioning plan, and a CW programme that reproduces real AI load modes. This structure provides a cause-and-effect relationship between on-site decisions and data centre operational readiness, reduces overall risk, and accelerates the achievement of design computing power. As part of the study, a matrix was formed, which is presented in the Table.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study confirmed the initial thesis that “AI readiness” is an integral property of a data centre construction project and is formed at the stage of organizational and technological decisions. A comparison of modern developments in heating engineering, power supply, water use and thermal integration with design and construction practices shows that the sustainable and effective placement of high-density AI clusters is determined not by the choice of computer racks, but by the consistency of decisions on site selection, architectural and planning layout, configuration of cooling and power supply systems, organization of commissioning works and life cycle management.

In terms of requirements, the target AI-ready architecture assumes the adoption of liquid cooling as the default solution with a pre-planned evolution to immersion technologies, confirmed power supply stability

against transient processes and harmonic distortions, as well as full-fledged water and heat KPI on par with energy KPI. The construction concept should include the utilization of low-potential heat and interfaces with external heating networks, modularity and prefabrication of MEP subsystems, cascaded power input, and programmable stress tests that reproduce the AI load profile. In this scenario, construction solutions become the primary determinants of operational performance indicators, from PUE/WUE/ERE to maintainability.

Risk analysis has revealed the limitations of fragmented approaches and the need to transition to a unified management scheme, where each risk is matched with a project activity, a measurable indicator, and an acceptance control procedure. A practical tool is the “risk map” and the associated regulatory compliance matrix, which ensure traceability from the initial site and network infrastructure constraints to the CW acts. The inclusion of GIS/MCDA assessments of mesoclimate, hydrogeology and regulatory regimes at the pre-investment stage allows external constraints to be translated into planning decisions and schedules, reducing the likelihood of late changes and technological conflicts.

The regulatory framework requires operationalization: international guidelines (EN 50600, ASHRAE TC 9.9 recommendations, ISO/IEC 30134 series) must be translated from declarative references into design parameters with explicit tolerances, test methods and acceptance criteria. Environmental requirements — noise, emissions, water footprint, energy reuse — should be enshrined in the initial permitting documentation so that their impact on layout, materials, and timelines is taken into account before contracts for long-cycle equipment are signed. Such institutionalization makes both target KPI and operating limits for high-density AI clusters verifiable.

Expected industry trends over the next five years point to the consolidation of liquid and immersion technologies, an increase in the share of factory-ready products, the widespread introduction of digital twins for construction and operation, the institutionalization of water and heat efficiency indicators, and the expansion of heat utilization practices. At the same time, the integration of data centres with the energy system will be strengthened through predictive load planning and field testing, and the geography of projects will shift in favour of sites with a favourable mesoclimate, accessible connection capacity and sustainable water resources. These shifts will cement the construction industry's role as a coordinator, ensuring that engineering, environmental, and regulatory requirements are aligned with the layout and technological solutions implemented.

The limitations of the study are related to the limited amount of publicly available operational data on the long-term operation of immersion systems, the heterogeneity of the regulatory framework in different jurisdictions, and the rapid technology cycle of hardware accelerators. Further research is envisaged in the standardization of components and interfaces of liquid and immersion systems at the construction level, in the development of unified

stress testing programmes with typical “AI profiles”, in the co-optimization of energy and water efficiency, taking into account the mesoclimate, and in the accumulation of empirical data on the economics of heat utilization in various urban and campus scenarios.

Taken together, the results form a comprehensive organizational and technological framework for the de-

sign and construction of AI-ready data centres. Its application makes it possible to reduce the overall risk, ensure the reproducibility of the required performance indicators, and accelerate the achievement of the design computing power, which means transforming AI requirements from a source of constraints into manageable parameters of the construction solution.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Azarifar M., Arik M., Chang J.Y. Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 247:123112. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123112
2. Kong R., Zhang H., Tang M., Zou H., Tian C., Ding T. Enhancing data center cooling efficiency and ability: A comprehensive review of direct liquid cooling technologies. *Energy*. 2024; 308:132846. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132846
3. Mohammed N.M., El-Maghlany W.M., Elhelw M., Abdelaziz A.H. Performance improvement of high-density data center via two-phase liquid immersion cooling. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025; 150:6. DOI: 10.1007/s10973-025-14006-0
4. Zhang Y., Fan C., Li G. Discussions of Cold Plate Liquid Cooling Technology and Its Applications in Data Center Thermal Management. *Frontiers in Energy Research*. 2022; 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.954718
5. Chen H., Li D. Current Status and Challenges for Liquid-Cooled Data Centers. *Frontiers in Energy Research*. 2022; 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.952680
6. Haghsheenas K., Setz B., Blosch Y., Aiello M. Enough hot air: the role of immersion cooling. *Energy Informatics*. 2023; 6(1). DOI: 10.1186/s42162-023-00269-0
7. Stahlhut M., Sekulla M., Großöhme P., Auweter A., Urbaneck T. Data Centers With Direct Liquid-Cooled Servers: Experimental Analysis and Modeling. *Energy Science & Engineering*. 2025; 13(7):3605-3619. DOI: 10.1002/ese3.70116
8. Lu Z., Di Y., Di H., Li X., Chen Z., Zhao C. et al. Optimization of data center thermal management performance under failure mode of rack-level heat pipe backplane system. *Building Simulation*. 2025; 18(6):1377-1392. DOI: 10.1007/s12273-025-1271-5
9. Mytton D. Data centre water consumption. *Npj Clean Water*. 2021; 4(1). DOI: 10.1038/s41545-021-00101-w
10. Karimi L., Yacuel L., Johnson J.D., Ashby J., Green M., Renner M. et al. Water-energy tradeoffs in data centers: A case study in hot-arid climates. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022; 181:106194. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106194
11. Lei N., Lu J., Shehabi A., Masanet E. The water use of data center workloads: A review and assessment of key determinants. *Resources, Conservation and Recycling*. 2025; 219:108310. DOI: 10.1016/j.resconrec.2025.108310
12. Karimi L., Shinh R., Laisure-Pool C., Green M., Yacuel L., Ashby J. et al. Energy and water dynamics in data center cooling: Insights from a modeling study in hot-arid climates. *Applied Thermal Engineering*. 2025; 276:126802. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126802
13. Pärssinen M., Wahlroos M., Manner J., Syri S. Waste heat from data centers: An investment analysis. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 44:428-444. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.023
14. Antal M., Cioara T., Anghel I., Gorzenski R., Januszewski R., Oleksiak A. et al. Reuse of Data Center Waste Heat in Nearby Neighborhoods: A Neural Networks-Based Prediction Model. *Energies*. 2019; 12(5):814. DOI: 10.3390/en12050814
15. Sun J., Wang S., Wang J., Tolbert L.M. Dynamic Model and Converter-Based Emulator of a Data Center Power Distribution System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022; 37(7):8420-8432. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3146354
16. Yuan X., Liang Y., Hu X., Xu Y., Chen Y., Kosonen R. Waste heat recoveries in data centers : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 188:113777. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113777
17. Khalid R., Wemhoff A.P., Khuc M., Nayar A.J., Schon S. Data Center Waste Heat Reuse: An Investment Analysis. *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*. 2025; 6(1). DOI: 10.1115/1.4067444
18. Gazzola V., Menoni S., Ghignatti P., Marini A., Mauri R., Oldani G. Analysis of Territorial Risks and Protection Factors for the Business Continuity of Data Centers. *Sustainability*. 2023; 15(7):6005. DOI: 10.3390/su15076005
19. Turek D., Radgen P. Optimized data center site selection — mesoclimatic effects on data center energy consumption and costs. *Energy Efficiency*. 2021; 14(3). DOI: 10.1007/s12053-021-09947-y
20. Radovanovic A., Chen B., Talukdar S., Roy B., Duarte A., Shahbazi M. Power Modeling for Effective Datacenter Planning and Compute Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022; 13(2):1611-1621. DOI: 10.1109/TSG.2021.3125275
21. Corigliano O., Algieri A., Fragiaco P. Turning Data Center Waste Heat into Energy: A Guide to Organic Rankine Cycle System Design and Performance Evaluation. *Applied Sciences*. 2024; 14(14):6046. DOI: 10.3390/app14146046

22. Arzumanyan M., Calzado E.R., Lin N., Bahadur V., Das J., Ko T.L. et al. Geospatial suitability analysis for data center placement: A case study in Texas, USA. *Sustainable Cities and Society*. 2025; 131:106687. DOI: 10.1016/j.scs.2025.106687

23. Chang Q., Huang Y., Liu K., Xu X., Zhao Y., Pan S. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers : a Review. *Sustainability*. 2024; 16(16):7222. DOI: 10.3390/su16167222

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Roman O. Samsonov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Laboratory of Organizational and Technological Systems for the Use of Artificial Intelligence in Construction (OTS); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SamsonovRO@mgsu.ru;

Victor S. Lotkin — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; victorlotkin@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.