

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том **15** выпуск **3 (57)**

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ

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

RESEARCH AND PRACTICE ONLINE JOURNAL

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

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

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

EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

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

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

EDITORIAL STAFF:

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

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

Подписано в свет 30.09.2025.

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

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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

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

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

INDEXING

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

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

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

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

The articles are assigned a digital identifier DOI.

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Карпенко Николай Иванович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 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

Мещерин 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

Nikolay I. Karpenko, Academician of RAACS, Dr. Sc. Engineering, Professor, Head of the Laboratory for Problems of Strength and Quality in Construction, Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 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	
Л.Ю. Гнедина Выбор ограждающей конструкции для жилых зданий в условиях сурового климата	6
Р.А. Гатиатуллина, А.М. Ибрагимов Расчет сжатых тонкостенных стержней по действующим нормативно-техническим документам разных стран	24
М.П. Саинов, А.А. Болдин Продолжительность консолидации грунта ядра каменно-земляной плотины	39
Н.Г. Серегин, А.С. Курдюков Панели CLT и МНМ в промышленном и гражданском строительстве	62
А.Н. Оржеховский, А.В. Танасогло, И.М. Гаранжа, В.Ф. Муцанов, Н.С. Смирнова Проектирование стальных решетчатых конструкций линий электропередачи с использованием параметров надежности на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9	74
АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ	
О.Л. Банцерева, М.И. Иванова Обоснование функционального состава многофункциональных общественных комплексов на основе развития требований к их проектированию	91
А.Р. Ключко Архитектура паллиативных учреждений стран Африки ...	113
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ	
А.В. Корнилова, В.А. Ермаков, А.В. Баулин Опрос жителей многоквартирных жилых домов о качестве капитального ремонта	126
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
А.А. Игнатьев, И.А. Чижиков Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок – щебень»	141
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
Э.А. Григорян, А.О. Рыбакова Генеративный дизайн в BIM для автоматизации архитектурных решений на основе требований клиентов	158
Л.А. Адамцевич, А.А. Лapidус Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий	176

CONTENT

BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS	
Lyubov' Yu. Gniedina Choice of enclosing structures for residential buildings in harsh climates	6
Regina A. Gatiatullina, Alexander M. Ibragimov Calculation of compressed thin-walled rods in accordance with current normative and technical documents of different countries	24
Mikhail P. Sainov, Aleksandr A. Boldin Duration of core soil consolidation of earth core rockfill dam	39
Nikolay G. Seregin, Artyom S. Kurdyukov CLT and MHM Panels in Industrial and Civil Engineering	62
Anatoliy N. Orzhehovskiy, Anton V. Tanasoglo, Igor M. Garanzha, Vladimir F. Mushchanov, Natalia S. Smirnova Design of steel lattice structures of power transmission lines using reliability parameters on the example of anchor-angle support U220-2+9	74
ARCHITECTURE. RECONSTRUCTION. RESTORATION. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT	
Olga L. Bantserova, Margarita I. Ivanova Substantiation of the functional composition of multifunctional public complexes based on the development of requirements for their design	91
Asmik R. Klochko Architecture of palliative care institutions in Africa	113
ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY	
Anna V. Kornilova, Valentin A. Ermakov, Aleksei V. Baulin Survey of residents of multi-apartment residential buildings on the quality of major repairs	126
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS. TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIALS PRODUCTION. NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	
Aleksey A. Ignatyev, Il'ya A. Chizhikov Assessment of damage and jamming ability of innovative 3D geogrid at the sand – crushed stone interface	141
INFORMATION SYSTEMS AND LOGISTICS IN CONSTRUCTION	
Erik A. Grigoryan, Angelina O. Rybakova Generative design in BIM for the automation of architectural solutions based on customer requirements	158
Liubov A. Adamtsevich, Azariy A. Lapidus Organizational and technological solutions for managing the life cycle of construction projects in integrated territorial development projects	176

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.232.7

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Выбор ограждающей конструкции для жилых зданий в условиях сурового климата

Любовь Юрьевна Гнедина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследований по выбору ограждающей конструкции для увеличения тепловой защиты здания в условиях сурового климата связана со снижением затрат на отопление. Это, в свою очередь, влияет на улучшение экологической обстановки в регионах, развитие строительной индустрии при резком увеличении цен на энергоресурсы и необходимости соблюдения требований энергетической эффективности, способствует повышению интереса к технологиям, которые могут обеспечить более эффективную тепловую защиту зданий.

Материалы и методы. Изучены применяемые приемы наружных ограждающих конструкций монолитно-каркасных жилых зданий и выбраны наиболее рациональные с точки зрения тепловой защиты решения для проектирования в условиях сурового климата.

Результаты. Исследованы используемые ограждающие конструкции в зданиях с каркасной конструктивной системой, рассмотрена необходимость повышения тепловой защиты зданий в Республике Саха (Якутия), изучена сырьевая база для строительства на территории Якутии. Выполнены анализ климатических условий, расчет теплофизических свойств конструкций, экономический анализ стоимости строительных материалов и затрат на возведение ограждающих конструкций.

Выводы. Исходя из результатов исследования, составлен перечень рассматриваемых конструкций, рассчитаны теплофизические и технико-экономические показатели для ограждающих конструкций жилых зданий. Опираясь на полученные результаты, выбран наилучший вариант наружной ограждающей конструкции с точки зрения тепловой защиты зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая защита зданий, энергоэффективность, наружные ограждающие конструкции, суровые климатические условия, теплотехнический расчет, местные сырьевые ресурсы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гнедина Л.Ю. Выбор ограждающей конструкции для жилых зданий в условиях сурового климата // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Автор, ответственный за переписку: Любовь Юрьевна Гнедина, GnedinaLYu@mgsu.ru.

Choice of enclosing structures for residential buildings in harsh climates

Lyubov' Yu. Gnedina

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

ABSTRACT

Introduction. The relevance of research on the choice of enclosing structures to increase the thermal protection of the building in harsh climates is associated with the reduction of heating costs. However, that affects the improvement of the environmental situation in the regions, the development of the construction industry in conditions of a sharp increase in energy prices and the need to comply with the requirements of energy efficiency, contributes to increased interest in technologies that can provide a more effective thermal protection of buildings.

Materials and methods. Types of enclosing structures of monolithic frame residential buildings are studied and the most rational solutions in terms of thermal protection for designing in harsh climate conditions are selected.

Results. Enclosing structures in buildings with frame structural system were studied, the necessity of increasing thermal protection of buildings in the Republic of Sakha was considered, the resource base for construction in Yakutia was studied. The climatic conditions were analyzed, calculation of thermophysical properties of structures, economic analysis of the cost of construction materials and the cost of building envelopes were made.

Conclusions. Based on the results of the study, a list of considered structures is compiled, thermophysical and technical and economic indicators for the enclosing structures of residential buildings are calculated. Obtained results led to the selection of the best type of enclosing structure with thermal protection.

KEYWORDS: thermal protection of buildings, energy efficiency, external enclosing structures, harsh climatic conditions, thermal calculation, local raw materials

FOR CITATION: Gnedina L.Yu. Choice of enclosing structures for residential buildings in harsh climates. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Corresponding author: Lyubov' Yu. Gnedina, GnedinaLYu@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство используемых энергетических ресурсов — невозобновляемые, следовательно, необходимо применять тепловую энергию рационально и принимать меры по уменьшению энергопотребления без ухудшения эксплуатационных показателей возводимых зданий и сооружений. На энергопотребление в период эксплуатации здания приходится 90 % от общего энергопотребления строительной отрасли, большая часть из этого объема уходит на жилые здания — 50–55 % [1].

Одним из способов сокращения расхода тепловой энергии является использование эффективных ограждающих конструкций. При проектировании энергоэффективной наружной ограждающей конструкции применяют конструкции с выраженным теплоизоляционным слоем. Помимо этого, требуемый уровень тепловой эффективности достигается исходя из рационального размещения теплоизоляционных слоев в составе конструкции и увеличения однородности конструкции [2].

В работах [3–11] проанализированы преимущества и недостатки современных ограждающих конструкций, имеющих в своем составе различные строительные материалы.

В настоящее время наибольшее распространение получили две конструктивные системы многослойных ограждающих конструкций — система с вентилируемой воздушной прослойкой и система штукатурного утепленного фасада. Благодаря воздушному зазору появляется возможность удаления влаги, конденсирующейся в слое утеплителя и несущей стены. Необходимая ширина прослойки зависит от расстояния между вентиляционными отверстиями, их длины, разницы температур и плотности воздуха. Согласно теории термодинамики минимальная величина воздушного зазора должна составлять 40 мм [12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим облицовочную систему с навесным вентилируемым фасадом. Система представля-

ет собой конструкцию, состоящую из кронштейнов, вертикальных и/или горизонтальных профилей, теплоизоляционного слоя и облицовочного слоя из различных материалов. В большинстве случаев применяется несущая подсистема из алюминия и стали. Недостаток системы — низкое значение коэффициента теплотехнической однородности за счет использования большого количества металлических включений. Для уменьшения тепловых потерь через металлические включения в системе вентилируемого навесного фасада применяют двойной слой утепления, такая конструкция увеличивает теплотехническую однородность вследствие перекрывания швов верхним слоем утеплителя [13].

Преимуществами вентилируемых фасадов можно назвать:

- способность обеспечивать защиту строительных конструкций от повреждений и атмосферных воздействий при сохранении хорошей вентиляции фасада;
- монтаж конструкции можно проводить вне зависимости от сезона;
- возможность замены облицовочного и теплоизоляционного материалов;
- возможность выбора различных облицовочных материалов.

Системы фасадные теплоизоляционные композитные (СФТК)

Имеют многослойную структуру, к основанию стены слой утеплителя крепится с помощью клеевого штукатурного раствора совместно с тарельчатыми анкерами, далее на теплоизоляционное изделие наносится базовый слой штукатурки с армированием сеткой, отделочным слоем служит декоративная штукатурка различных видов с последующим окрашиванием или без него. Преимущество конструкции заключается в ее однородности, значение количества теплопроводных включений — одно из самых наименьших среди многослойных конструкций. Высокий показатель однородности можно отнести и к недостатку конструкции, так как в случае выхода из строя или необходимости замены

системы разрушаются все слои СФТК. Проводить работы по устройству СФТК требуется при температуре не менее +5 °С иначе понижается адгезионная и ударная прочность штукатурных составов. При необходимости создания штукатурного слоя в условиях с более низкими наружными температурами следует применять специализированные штукатурные материалы с модифицирующими добавками, понижающие возможную температуру проведения работ до –10 °С [14].

Облицовка из кирпичной кладки

Применение облицовки кирпичом в многоэтажных зданиях с опиранием на межэтажное перекрытие не допускается при высоте этажа 3,6 м. При использовании лицевого кирпича стоит устраивать вертикальные и горизонтальные деформационные швы, дабы избежать аварийной ситуации при возникновении температурно-влажностных усилий из-за температурных перепадов, а также применять антикоррозийные гибкие связи для обеспечения целостности конструкции. Для соблюдения необходимого влажностного состояния конструкции следует устраивать воздушную прослойку между лицевым кирпичом и теплоизоляционным слоем, помимо этого полагается предусматривать продухи в кладке для циркуляции воздуха. К преимуществам данного вида облицовки можно отнести:

- доступность строительных материалов;
- высокий уровень огнестойкости;
- устойчивость к атмосферным воздействиям;
- экологичность.

Недостатки системы:

- трудоемкость возведения и необходимость в высококвалифицированных специалистах;
- ограничение архитектурного разнообразия;
- низкий коэффициент теплотехнической однородности вследствие применения различных гибких связей и бетонных включений;
- большая нагрузка на фундамент;
- использование материалов для внутренне-го слоя конструкции, отличных от кирпича, может повлечь независимые деформации между лицевым слоем и внутренней конструкцией.

Исходя из широкого выбора материалов и зависимости теплотехнических характеристик ограждающих конструкций от расположения слоев в массиве стен, возникает множество различных конструкций с уникальными теплотехническими параметрами. Климатические условия, а также локационная доступность сырья влияют на выбор материала, состав и толщину ограждающей конструкции. Для нахождения наиболее рационального вида ограждающей конструкции, соответствующей требованиям тепловой защиты здания, целесообразно провести исследование целого комплекса конструкций и определить наиболее оптимальные варианты исходя из теплотехнических свойств и экономических показателей.

Необходимость повышения энергоэффективности ограждающей конструкции на территории Севера и, в частности, в Республике Саха (Якутия)

Опираясь на схематическую карту районирования северной строительной климатической зоны России, представленной в СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»¹, территории Республики Саха находятся в наиболее суровых климатических условиях.

Якутия стоит на первом месте по количеству общих запасов природных ресурсов в России, на ее территории расположено 2959 учтенных Госбалансом месторождений по 59 видам сырья на 2020 г. Для улучшения экономики нашей страны развитие стратегически значимых субъектов является приоритетной задачей. Несмотря на существенный экономический потенциал, плотность населения невелика и составляет на 2021 г. 0,32 чел/км² — это один из самых низких показателей по всей России. Якутия располагается в центре Восточной Сибири, длительность зимнего периода в разы превышает летний. Климат отличается значительной разницей температур в холодное и теплое время года, небольшим количеством осадков и слабыми ветрами.

С целью заинтересованности населения и улучшения экономической ситуации необходимо создавать благоприятные условия для эксплуатации зданий и сооружений, а также следить за эффективным использованием тепловой энергии и повышением энергоэффективности зданий. Согласно Постановлению Правительства Республики Саха (Якутия) «О проекте Стратегии социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2030 года с определением целевого видения до 2050 года» для социально-экономического развития республики и повышения уровня жизни одним из стратегических приоритетов является создание комфортной и безопасной среды проживания для человека.

На 2019 г. количество аварийного жилья в Республике Саха составило 3629 многоквартирных домов, вследствие чего существует острая необходимость в проектировании и строительстве большого количества жилых зданий.

В климатических условиях с низкими температурами (отопительный период в г. Якутске — 252 дня для жилых зданий) увеличивается потребление энергоресурсов, поэтому изучение, анализ и разработка мероприятий по сохранению и рациональному использованию поступающего тепла в здания — актуальная задача.

Все вышесказанное указывает на необходимость исследования вопросов рационального проектирования энергоэффективных ограждающих конструкций

¹ СП 131.13330.2020. Строительная климатология. М. : Стандартинформ, 2021. 153 с.

зданий, в частности, на территории с суровым климатом, а именно в Республике Саха.

Сырьевая база для строительства на территории Республики Саха (Якутия)

В связи с суровыми климатическими условиями транспортировка материалов имеет ряд сложностей, таких как большая цена и длительные сроки перевозки, что ведет к увеличению сроков строительства и повышению себестоимости объектов. Использование строительных материалов местного производства может решить возникновение этих проблем и повысить экономическую эффективность строительства.

На территории республики находится существенное количество сырья, которое может быть использовано для производства строительных материалов. Территория Якутии богата глиняным сырьем, которое возможно применять для производства изделий из керамзита. Известно 43 месторождения керамзитового сырья на территории республики, 24 из которых не учтены сводным балансом запасов. На данный момент эксплуатируются только 4 месторождения. Согласно исследованиям [15], на территории Якутии есть месторождения глин, которые можно использовать для производства легкого и высокопрочного керамзитобетона для строительства зданий различной высоты. Залежи глиняного сырья, расположенные в Якутии, возможно применять не только для производства изделий из керамзита, а также для получения лицевого кирпича, отвечающего требованиям ГОСТ 530–2012 [16–18].

На основе анализа научно-технических исследований установлена возможность производства пенобетона проектной марки D600 с использованием портландцементного клинкера АО ПО «Якутцемент» и минерального сырья Якутии. В качестве минеральных добавок для изготовления пенобетона можно применять природный цеолит Сунтарского района и кварцевый песок Ленского бассейна. Блоки из пенобетона, произведенного с использованием местного сырья, подходят для возведения наружных самонесущих стен монолитно-каркасных зданий [19, 20].

Инаглинское месторождение в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия) — единственная сырьевая база вермикулита на Дальнем Востоке России. Вспученный вермикулит — экологически безопасный материал, который за счет своих теплоизоляционных свойств и сравнительно небольшого веса может применяться для производства штукатурных смесей для наружной и внутренней отделки.

Благодаря такой богатой сырьевой базе на территории республики имеется возможность строительства из различных строительных материалов: керамический кирпич, теплоизоляционные изделия на основе керамзита и ячеистого бетона, вермикулитовые материалы для оштукатуривания стен [21, 22]. Для дальнейшего исследования принимаются наружные ограждающие конструкции, подобранные исходя из конструктивной системы рассматриваемых зданий (каркасная), с учетом наиболее распространенных конструктивных решений наружных стен (табл. 1).

Табл. 1. Типы ограждающих конструкций

Наименование материала	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Толщина δ , мм	Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	Паропроницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
<i>Трехслойная конструкция стены по СФТК с использованием вермикулитовой штукатурки</i>				
1.1 Тип конструкции				
Штукатурка вермикулитовая для наружных работ F50	1000	30	0,15	0,07
Плиты минераловатные	120	150	0,042	0,32
Штукатурно-клеевая смесь для минеральных плит, применение в холодных условиях	5	5	0,76	0,035
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; B2,5; F35	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
1.2 Тип конструкции				
Штукатурка вермикулитовая для наружных работ F50	1000	30	0,15	0,12
Плиты минераловатные	120	130	0,042	0,32
Штукатурно-клеевая смесь для минеральных плит	5	5	0,76	0,035
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм B2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09

Наименование материала	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Толщина δ , мм	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Паропроницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
<i>Трехслойная конструкция с вентилируемым зазором с облицовкой кирпичом</i>				
2.1 Тип конструкции				
Керамический кирпич лицевой пустотелый утолщенный ГОСТ 530–2012 М100; F75; на цементном растворе М100	1600	120	0,58	0,14
Воздушный зазор	–	40	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; B2,5	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
2.2 Тип конструкции				
Керамический кирпич лицевой пустотелый утолщенный ГОСТ 530–2012 М100; F75; на цементном растворе М100	1600	120	0,58	0,14
Воздушный зазор	–	40	–	–
Плиты минераловатные	120	180	0,042	0,32
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм B2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
<i>Трехслойная конструкция стены с вентилируемым зазором по системе навесной вентилируемый фасад (НВФ)</i>				
3.1 Тип конструкции				
Композитные плиты по системе НВФ	7000	2	48	–
Воздушный зазор	–	60	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; B2,5	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
3.2 Тип конструкции				
Композитные плиты по системе НВФ	7000	2	48	–
Воздушный зазор	–	60	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм B2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09

Теплотехнический расчет

При выполнении теплотехнического расчета были учтены материалы, изложенные в статье [23].

Теплотехнический расчет производится для жилого многоэтажного здания на территории г. Якутска. Для проведения расчетов на соблюдение поэлементного требования согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»² рассматривается глухая

часть стены каркасно-монолитного здания размером 1000 × 1000 мм. В качестве точечных включений рассматриваются теплозащитные элементы, рекомендованные для соответствующих видов стеновых конструкций СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей»³.

² СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М. : Мин-регион России, 2012. 100 с.

³ СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. М. : Минстрой России, 2015. 72 с.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 2, на их основе получены расчетные показатели для района строительства (табл. 3).

Для трехслойных конструкций стен с облицовкой по СФТК с наружными штукатурными слоями в качестве точечных неоднородностей принимаются тарельчатые анкеры с заглушкой, обеспечивающей гидро- и теплоизоляцию из морозостойкого полиэтилена, стальной распорный элемент имеет антикоррозийное покрытие. При возведении трехслойной стены с облицовочным слоем из лицевого кирпича используются гибкие связи металлические из коррозионностойкой стали с тарельчатым дюбелем, обеспечивающие создание вентиляционного зазора толщиной 40 мм. Для крепления системы навесного вентилируемого фасада используются кронштейны алюминиевые, усиленные высотой 150 мм

и шириной 55 мм. Крепление кронштейнов производится к межэтажным перекрытиям.

Удельные потери теплоты через точечные включения χ_k , Вт/°С, и их количество на 1 м² n_k , шт/м², для различных типов конструкции указаны в табл. 4, данные были определены, опираясь на техническую документацию производителей и нормативную документацию СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей».

Для соблюдения поэлементного требования необходимо, чтобы величина приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки $R_{o\text{пр}}$, (м²·°С)/Вт, была больше нормируемого значения $R_o^{\text{норм}}$, (м²·°С)/Вт (СП 50).

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки без учета линейных

Табл. 2. Исходные данные для проведения теплотехнического расчета

Расчетный параметр	Расчетное значение по СП 50.13330.2012
Влажностный режим	Нормальный ²
Относительная влажность воздуха внутри здания ϕ_v , %	55 (по СП 50)
Условия эксплуатации конструкции	A (по СП 50)
Температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 $t_{н^{\circ}}$, °С	–52 (по СП 131)
Продолжительность отопительного периода со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8 °С $Z_{от}$, сут	252 (по СП 131)
Средняя температура наружного воздуха для периода со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8 °С $t_{от}$, °С	–20,6 (по СП 131)
Расчетная средняя температура внутреннего воздуха помещений здания для теплозащиты $t_{в}$, °С	21
Коэффициенты теплоотдачи: • внутренней поверхности конструкций $\alpha_{в}$, Вт/(м ² ·°С); • наружной поверхности конструкций с воздушным зазором $\alpha_{н}$, Вт/(м ² ·°С); • наружной поверхности конструкций без воздушного зазора $\alpha_{н}$, Вт/(м ² ·°С)	8,7 (по СП 50) 12 (по СП 50) 23 (по СП 50)

Табл. 3. Расчетные показатели для района строительства

Расчетный параметр	Расчетное значение
Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), °С·сут/год	10 483,2
Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции $R_o^{\text{норм}}$, м ² ·°С/Вт	5,069
Базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции $R_o^{\text{тр}}$, м ² ·°С/Вт	5,069

Табл. 4. Расчетные показатели для района строительства

Тип конструкции	Тип точечных включений	n_k , шт/м ²	χ_k , Вт/°С
1.1	Тарельчатые анкеры	6,7	0,001
1.2	Тарельчатые анкеры	6,7	0,001
2.1	Гибкие связи	9,0	0,006
2.2	Гибкие связи	7,0	0,006
3.1	Кронштейны	0,56	0,079
	Тарельчатые анкеры	6,94	0,001
3.2	Кронштейны	0,56	0,080
	Тарельчатые анкеры	6,94	0,001

Табл. 5. Сравнительный анализ конструкций

Тип конструкции	R_{n1}^{TP}	R_{n2}^{TP}	R_n	Плоскость увлажнения
1.1	0,671	2,446	2,334	Слой утеплителя (плиты минераловатные)
1.2	0,666	2,869	2,536	
2.2	2,160	1,752	2,549	
3.2	0,000	1,600	2,612	

элементов R_o^{np} , (м²·°C)/Вт определяется по формуле (СП 50):

$$R_o^{np} = \frac{1}{1/R_o^{ysl} + \sum n_k \chi_k}, \tag{1}$$

где R_o^{ysl} — осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции, (м²·°C)/Вт.

Коэффициент однородности рассчитан по формуле (СП 50):

$$r = R_o^{np}/R_o^{ysl}. \tag{2}$$

Расчет конструкции на защиту от переувлажнения

Необходимо проверить конструкцию на защиту от переувлажнения, чтобы определить, будет ли выпадать конденсат в толще конструкции (СП 50). Для обеспечения этого требования необходимо, чтобы конструкция была запроектирована с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев (от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения) R_n , (м²·ч·Па)/мг, не менее наибольшего из требуемых значений паропроницанию R_{n1}^{TP} , R_{n2}^{TP} , (м²·ч·Па)/мг, т.е. следует обеспечить соблюдение требований (СП 50):

$$R_n > R_{n1}^{TP};$$

$$R_n > R_{n2}^{TP},$$

где R_{n1}^{TP} — требуемое сопротивление паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации; R_{n2}^{TP} — требуемое сопротивление паропроницанию из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха (СП 50).

Расчет экономических показателей ограждающих конструкций

Требуется рассчитать себестоимость и общую сметную стоимость возведения ограждающих конструкций.

Используем для: определения расценок на материалы индекс $K_m = 10,99^4$; расценок на эксплуатацию машин и механизмов $K_{эм} = 18,34^5$; установления расценок на оплату труда $K_{зп} = 65,38^6$.

Полная сметная стоимость складывается из прямых затрат, накладных расходов и сметной прибыли. Следует учесть затраты от уплаты налога на добавленную стоимость (НДС). Размер НДС составляет 20 % от сметной стоимости.

Выбор наиболее эффективной ограждающей конструкции для обеспечения тепловой защиты здания в условиях сурового климата

Для проведения окончательного сравнительного анализа была рассчитана нагрузка от 1 пог. м стеновой конструкции на плиту перекрытия. Результаты проведенных расчетов указаны в табл. 5.

Конструкции 3.2 удовлетворяет обязательное поэлементное требование, проходит проверку на защиту от переувлажнения, толщина конструкции является ниже средней в сравнении с рассматриваемыми в работе типами конструкций. Нагрузка на перекрытия, оказываемая наружной стеной, почти вдвое меньше в сравнении с конструкциями с облицовочным слоем из керамического кирпича.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты теплотехнического расчета рассматриваемых конструкций представлены в табл. 6.

На основании расчетов можно сделать вывод, что конструкция 2.1 с конструктивно-теплоизоляционным слоем из керамзитобетона и облицовкой из лицевого кирпича имеет наибольшую толщину конструкции и величину утеплителя выше среднего

⁴ Об утверждении Методики определения сметных цен на материалы, изделия, конструкции, оборудование и цен услуг на перевозку грузов для строительства : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20.12.2016 № 1001/пр.

⁵ Расценки на эксплуатацию строительных машин и авто-транспортных средств : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26.12.2019 № 876/пр.

⁶ Об утверждении Методики определения сметных цен на затраты труда работников в строительстве : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.07.2022 № 534/пр.

Табл. 6. Результаты теплотехнического расчета

Тип	Толщина конструкции δ_k , мм	Толщина утеплителя $\delta_{ут}$, мм	$R_o^{пр}$, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$	Коэффициент однородности, учитывающий точечные включения r
1.1	595	150	5,687	0,96
1.2	485	130	5,425	0,96
2.1	730	200	5,225	0,72
2.2	640	180	5,424	0,78
3.1	592	200	5,105	0,73
3.2	522	200	5,323	0,74

значения в 1,23 и 1,13 раз соответственно, при этом приведенное значение сопротивления теплопередачи с учетом точечных включений является наименьшим. Конструкция 3.1 также имеет толщину утеплителя выше среднего значения в 1,13 раз, при этом приведенное значение сопротивления теплопередачи наименьшее из рассматриваемых конструкций. На базе проведенного анализа можно сказать, что стеновые конструкции из керамзитобетонных блоков с воздушным зазором и облицовкой лицевым кирпичом, а также облицовкой по навесной фасадной системе композитными плитами не рекомендуется применять в рассмотренных условиях с суровым климатом. Опираясь на данные табл. 5, можно убедиться, что конструкции по СФТК имеют наименьшее количество точечных теплопроводных включений, конструкции наиболее однородны.

Для выполнения дальнейшего исследования конструкции тип 2.1 и 3.1 следует исключить из списка рассматриваемых. Результаты расчета на защиту от переувлажнения приведены в табл. 7.

Конструкции с отделкой по СФТК не проходят проверку на защиту от переувлажнения и не удов-

летворяют требованиям по паропроницаемости, следовательно, в этих конструкциях будет накапливаться влага. Зона максимального увлажнения находится в слое утеплителя: минеральная вата ПЖ, за счет переувлажнения эксплуатационные и теплоизоляционные свойства утеплителя и штукатурной облицовки будут значительно снижены, что может привести к созданию неблагоприятных условий для пребывания человека и повышению тепловых потерь через конструкцию. Учитывая результаты, конструкции не могут быть использованы для эксплуатации в зданиях и сооружениях. Для дальнейшего исследования конструкции типа 1.1, 1.2 не будут использованы.

Результаты по расчету сметной стоимости строительства рассматриваемых конструкций стен указаны в табл. 8.

Устройство слоя отделки из керамического кирпича на 21,7 % эффективнее, чем устройство системы навесного вентилируемого фасада согласно локальной смете.

Табл. 7. Результаты расчета на защиту от переувлажнения

Тип конструкции	$R_{n1}^{тр}$	$R_{n2}^{тр}$	R_n	Плоскость увлажнения
1.1	0,671	2,446	2,334	Слой утеплителя (плиты минераловатные)
1.2	0,666	2,869	2,536	
2.2	2,160	1,752	2,549	
3.2	0,000	1,600	2,612	

Табл. 8. Результаты сметного расчета на 1 м²

Наименование затрат	Сметная стоимость в базисном уровне цен, руб.	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
Итого прямые затраты	16 504	66 021
Итого фонд оплаты труда (ФОТ)	388,62	25 408
Итого накладные расходы	436,86	28 562
Итого сметная прибыль	245,02	16 019
Итого по конструкции типа 3.2 с учетом НДС		132 724
Итого прямые затраты	17 227,43	53 143,85
Итого ФОТ	517,14	33 811
Итого накладные расходы	555,26	36 303
Итого сметная прибыль	275,69	18 024
Итого по конструкции типа 4.2 с учетом НДС		169 541

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе научно-исследовательской работы выявлено, что наилучшим вариантом конструкции для проектирования с точки зрения тепловой защиты здания в условиях сурового климата является конструкция из пенобетонных блоков D600 толщиной 300 мм с теплоизоляционным слоем из минераловатного утеплителя ПЖ120 толщиной 200 мм с применением навесной фасадной системы с отделкой композитными панелями и системой крепления к межэтажному перекрытию.

Конструкция с облицовочным слоем из лицевого кирпича имеет больший вес и толщину. Конструкция из пенобетонных блоков D600 толщиной 300 мм с теплоизоляционным слоем из минераловатного утеплителя ПЖ120 толщиной 180 мм и лицевым слоем из керамического кирпича с устрой-

ством вентилируемого зазора на 22 % эффективнее конструкции 3.2 по экономическим показателям, исходя из этого рекомендовано продолжить изучение возможности использования данного типа конструкции для малоэтажных жилых зданий в условиях сурового климата.

Конструкции с применением пенобетонных блоков и керамических изделий возможно использовать для строительства эффективных ограждающих конструкций, таким образом рекомендовано продолжить изучение применения местных ресурсов для производства указанных материалов с целью увеличения экономической эффективности конструкций. Сдерживающим фактором служит низкая культура производства пенобетонных блоков и, как следствие, неустойчивые теплотехнические и прочностные характеристики блоков даже в пределах одной партии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гликин С.М. Современные ограждающие конструкции и энергоэффективность зданий. М., 2003. 157 с.
2. Adilhodzhayev A., Shaumarov S., Shipacheva E., Shermuhamedov U. New method for diagnostic of heat engineering and mechanical properties of cellular concrete // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 9. Issue 1. Pp. 6885–6887. DOI: 10.35940/ijeat.a2993.109119
3. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций : монография. М. : НИИСФ РААСН, 2004. 322 с. EDN QNKKYB.
4. Ясин Ю.Д., Ясин В.Ю., Ли А.В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 33–35. EDN IBEEST.
5. Хаит В.Л. Фундаментальная наука и жилище будущего // Жилищное строительство. 2004. № 10. С. 4–5. EDN IXUGJH.
6. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М. : Машиностроение-1, 2006. EDN QMJGGF.
7. Табунчиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-пресс, 2003. 192 с.
8. Табунчиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий (2-е издание, исправленное и дополненное). М. : АВОК, 2012. 204 с. EDN SXQNSV.
9. Савин В.К. Строительная физика. Энергоэкономика. М. : Лазурь, 2011. 415 с. EDN QNPJFL.
10. Опарина Л.А. Результаты расчета энергоемкости жизненного цикла зданий // Жилищное строительство. 2013. № 11. С. 50. EDN RKVZMJ.
11. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения : монография. М. : НИИСФ, 2008. 495 с.
12. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Гуцин А.В. Воздушная прослойка в многослойных ограждающих конструкциях при нестационарном тепло- и массопереносе // Информационная среда вуза : мат. XI Междунар. науч.-техн. конф. 2004. 676 с.
13. Юн А.Я. Анализ эффективности двухслойного и однослойного утепления вентилируемых фасадов // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 77. EDN ZCSLAD.
14. Косарев Л.В., Добрынкина О.В., Болдырев Н.Ю., Костюкова Ю.С., Большанов С.А. Выбор современных модификаторов для устройства штукатурных фасадов зданий в условиях Крайнего Севера // Инновации и инвестиции. 2021. № 11. С. 168–171. EDN COEXLW.
15. Местников А.Е. Глинистое сырье Якутии для производства керамзита // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 3. С. 30–34. DOI: 10.17513/snt.39069. EDN YSCCMS.
16. Трепалина Ю.Н., Кириллова Н.К. Керамический кирпич из сырья Якутии с добавлением тонкомолотого стеклобоя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 138–143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465. EDN ZDDGHR.
17. Осорова Р.С., Колесов М.В., Михайлов Д.А. Строительная керамика из сырья Якутии с модифицирующими добавками // Энергия молодых — строительному комплексу : сб. мат. XI Всеросс. науч.-техн. конф. 2017. С. 81–84.

18. Егорова А.Д., Осорова Р.С., Слепцова Л.В., Дьячковская Е.С., Ядреева З.И. Актуальность организации производства керамического кирпича в Якутии // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение : сб. мат. III Всеросс. науч.-практ. конф. 2014. С. 247–250. EDN SSFJSL.

19. Местников А.Е., Семенов С.С., Федоров В.И. Производство и применение пенобетона автоклавного твердения в условиях Якутии // Фундаментальные исследования. 2015. № 12–3. С. 490–494. EDN VDFWPX.

20. Рожин В.Н. Пенобетон на композиционном вяжущем из сырьевых ресурсов Якутии : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2022. 165 с. EDN LULGGQ.

21. Буренина О.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е. Сырьевая база производства строительных материалов в Республике Саха (Якутия) // Инновации в науке. 2017. № 5 (66). С. 69–73. EDN YHQZQL.

22. Местников А.Е., Семенов С.С., Васильева Д.В. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 12–1. С. 80–84. EDN ZXPVTB.

23. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103439. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103439

Поступила в редакцию 20 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 20 января 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Любовь Юрьевна Гнедина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 298544, Scopus: 57200283960, ResearcherID: AFN-6870-2022, ORCID: 0000-0002-3402-644X; GnedinaLYu@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Most of the energy resources used are non-renewable, therefore, it is necessary to use thermal energy rationally and take measures to reduce energy consumption without deteriorating the performance of the buildings and structures constructed. Energy consumption during the building operation period accounts for 90 % of the total energy consumption by the construction industry, most of this amount is spent on residential buildings — 50–55 % [1].

One of the ways to reduce heat energy consumption is the use of efficient building envelopes. When designing an energy-efficient exterior envelope, structures with a pronounced thermal insulation layer are used. In addition, the required level of thermal efficiency is achieved based on the rational placement of thermal insulation layers in the structure and increasing the homogeneity of the structure [2].

The works [3–11] analyze the advantages and disadvantages of modern building envelopes with different building materials.

Currently, two structural systems of multilayer building envelopes are the most widespread: the system with a ventilated air gap and the system of plaster insulated facade. Thanks to the air gap, moisture condensing in the insulation layer and the load-bearing wall can be removed. The required width of the air gap depends on the distance between the ventilation openings, their length, temperature difference and air density. According to the theory of thermodynamics, the minimum value of the air gap should be 40 mm [12].

MATERIALS AND METHODS

Consider a cladding system with a curtain-type ventilated façade. The system is a structure consisting of brackets, vertical and/or horizontal profiles, a thermal insulation layer and a cladding layer made of various materials. In most cases, a supporting sub-system made of aluminium and steel is used. The disadvantage of the system is the low value of the coefficient of thermal homogeneity due to the use of a large number of metal inclusions. In order to reduce heat losses through metal inclusions in the ventilated curtain facade system, a double layer of insulation is used; this design increases the thermal homogeneity due to the overlapping of joints with the upper layer of insulation [13].

The advantages of ventilated facades are:

- the ability to provide protection of building structures from damage and weathering while maintaining good ventilation of the facade;
- installation of the structure can be carried out regardless of the season;
- the possibility of replacing cladding and thermal insulation materials;
- the possibility of choosing different cladding materials.

Facade thermal insulation composite systems (FTCS)

They have a multilayer structure, the insulation layer is fixed to the wall base with the help of adhesive-plastering mortar together with disc anchors, then the base layer of plaster with mesh reinforcement is ap-

plied to the heat-insulating product, the finishing layer is decorative plaster of various types with or without subsequent painting. The advantage of the construction lies in its homogeneity, the value of the number of thermal conductive inclusions is one of the lowest among multilayer constructions. The high homogeneity index can also be attributed to the disadvantage of the construction, because in case of failure or the need to replace the system, all layers of FTCS are destroyed. It is necessary to carry out works on the device FTCS at a temperature of at least $+5^{\circ}\text{C}$ otherwise the adhesion and impact strength of plaster compositions decreases. If it is necessary to create a plaster layer in conditions with lower outside temperatures, it is necessary to use specialized plastering materials with modifying additives that reduce the possible temperature of works down to -10°C [14].

Brickwork cladding

The use of brick cladding in multi-storey buildings resting on the floor slab is not permitted at a storey height of 3.6 m. When using face bricks, it is necessary to make vertical horizontal expansion joints in order to avoid an emergency situation in case of temperature and humidity forces due to temperature fluctuations, and to use anti-corrosion flexible bonds to ensure the integrity of the structure. In order to maintain the required humidity state of the structure, an air gap should be created between the face brick and the thermal insulation layer, in addition to this it is necessary to provide vents in the masonry for air circulation. The advantages of this type of cladding include:

- availability of construction materials;
- high level of fire resistance;
- resistance to atmospheric influences;
- environmental friendliness.

Disadvantages of the system:

- labour-intensive erection and the need for highly qualified specialists;
- limitation of architectural diversity;
- low coefficient of thermal homogeneity due to the use of various flexible links and concrete inclusions;
- high load on the foundation;
- the use of materials for the inner layer of the structure other than bricks may entail independent deformations between the face layer and the inner structure.

Based on the wide choice of materials and the dependence of the thermal performance of the envelope on the arrangement of layers in the wall mass, many different structures with unique thermal performance parameters arise. Climatic conditions as well as the local availability of raw materials influence the choice of material, composition and thickness of the envelope. In order to find the most rational type of envelope structure that meets the requirements of thermal protection of the building, it is advisable to conduct a study of a whole complex of structures and determine the most optimal options based on thermophysical properties and economic indicators.

The need to improve the energy efficiency of the building envelope in the North and, in particular, in the Republic of Sakha (Yakutia)

Based on the schematic map of zoning of the northern construction climatic zone of Russia, presented in CP 131.13330.2020 "Construction Climatology"¹, the territory of the Republic of Sakha is located in the most severe climatic conditions. The territories of the Republic of Sakha are located in the most severe climatic conditions.

Yakutia ranks first in the number of total reserves of natural resources in Russia, with 2959 deposits of 59 types of raw materials accounted for by the State Balance for 2020. To improve the economy of our country, the development of strategically important subjects is a priority task. Despite its significant economic potential, the population density is low and amounts to 0.32 people/km² in 2021, one of the lowest figures in the whole of Russia. Yakutia is located in the centre of Eastern Siberia, and the winter period is many times longer than the summer period. The climate is characterized by a significant temperature difference between cold and warm seasons, low precipitation and weak winds.

In order to keep the population interested and improve the economic situation, it is necessary to create favourable conditions for the operation of buildings and structures, as well as to monitor the efficient use of heat energy and increase the energy efficiency of buildings. According to the Resolution of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) "The Draft Strategy of Socio-Economic Development of the Republic of Sakha (Yakutia) until 2030 with the definition of the target vision until 2050", one of the strategic priorities for socio-economic development of the Republic and improvement of living standards is to create a comfortable and safe living environment for people.

As of 2019, the number of emergency housing in the Republic of Sakha totaled 3,629 apartment buildings, as a result of which there is an urgent need to design and construct a large number of residential buildings.

In climatic conditions with low temperatures (the heating period in Yakutsk is 252 days for residential buildings), the consumption of energy resources increases, so the study, analysis and development of measures to preserve and rationally use the incoming heat in buildings is an urgent task.

All of the above points to the need to study the issues of rational design of energy-efficient building envelopes, in particular, in the territory with a harsh climate, namely, in the Republic of Sakha.

Raw material base for construction in the Republic of Sakha (Yakutia)

Due to harsh climatic conditions, transportation of materials has a number of difficulties, such as high

¹ CP 131.13330.2020. Construction climatology. Moscow, Standardinform, 2021; 153.

price and long transport times, which leads to longer construction periods and higher costs of construction projects. The use of locally produced construction materials can solve these problems and increase the economic efficiency of construction.

There is a significant amount of raw materials on the territory of the Republic that can be used for the production of construction materials. The territory of Yakutia is rich in clay raw materials that can be used for the production of expanded clay products. There are 43 known deposits of expanded clay raw materials on the territory of the republic, 24 of which are not included in the consolidated balance of reserves. At the moment only 4 deposits are exploited. According to studies [15], there are clay deposits on the territory of Yakutia, which can be used for the production of light and high-strength expanded clay concrete for the construction of buildings of various heights. Deposits of clay raw materials located in Yakutia can be used not only for the production of expanded clay products, but also for the production of face bricks that meet the requirements of GOST 530–2012 [16–18].

Based on the analysis of scientific and technical research, the possibility of producing foam concrete of the design grade D600 using Portland cement clinker

of JSC PO “Yakutcement” and mineral raw materials of Yakutia has been established. Natural zeolite from Suntar district and quartz sand from Lena basin can be used as mineral additives for foamed concrete production. Blocks made of foam concrete produced with the use of local raw materials are suitable for the construction of external self-supporting walls of monolithic frame buildings [19, 20].

Inaglinskoye deposit in Neryungri district of the Republic of Sakha (Yakutia) is the only raw material base of vermiculite in the Far East of Russia. Uplifted vermiculite is an environmentally safe material, which due to its thermal insulation properties and relatively low weight can be used for the production of plaster mixtures for exterior and interior finishing.

Due to such a rich raw material base on the territory of the republic there is a possibility of construction from various building materials: ceramic bricks, heat insulating products based on expanded clay and cellular concrete, vermiculite materials for wall plastering [21, 22]. For further research, the external envelope structures selected on the basis of the structural system of the buildings under consideration (frame), taking into account the most common design solutions of external walls (Table 1).

Table 1. Types of envelope structures

Name of material	Density ρ_0 , kg/m ³	Thickness δ , mm	Thermal conductivity λ , W/(m·°C)	Vapour permeability μ , mg/(m·h·Pa)
<i>Three-layer wall construction on FTCS using vermiculite plaster</i>				
1.1 Type of construction				
Vermiculite plaster for exterior works F50	1,000	30	0.15	0.07
Mineral wool boards	120	150	0.042	0.32
Plastering and adhesive mix for mineral boards, application in cold conditions	5	5	0.76	0.035
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5; F35	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
1.2 Type of construction				
Vermiculite plaster for exterior works F50	1,000	30	0.15	0.12
Mineral wool boards	120	130	0.042	0.32
Plastering and adhesive mix for mineral boards	5	5	0.76	0.035
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
<i>Three-layer construction with ventilated gap with brick cladding</i>				
2.1 Type of construction				
Ceramic brick face hollow thickened GOST 530-2012 M100; F75; on cement mortar M100	1,600	120	0.58	0.14
Air gap	–	40	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32

Name of material	Density ρ_0 , kg/m ³	Thickness δ , mm	Thermal conductivity λ , W/(m·°C)	Vapour permeability μ , mg/(m·h·Pa)
Three-layer construction with ventilated gap with brick cladding				
2.1 Type of construction				
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
2.2 Type of construction				
Ceramic brick face hollow thickened GOST 530-2012 M100; F75; on cement mortar M100	1,600	120	0.58	0.14
Air gap	–	40	–	–
Mineral wool boards	120	180	0.042	0.32
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
Three-layer wall construction with a ventilated gap using a curtain-type ventilated facade (CVF) system				
3.1 Type of construction				
Composite slabs using the CVF system	7,000	2	48	–
Air gap	–	60	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
3.2 Type of construction				
Composite slabs using the CVF system	7,000	2	48	–
Air gap	–	60	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09

Thermal calculation

When performing the thermal calculation, the materials described in the article [23] were taken into account.

Thermal calculation is performed for a residential multi-storey building in Yakutsk. To perform calculations for compliance with the element-by-element requirement according to CP 50.13330.2012 “Thermal Protection of Buildings”² the blind part of the wall of a frame-monolithic building with the size of 1,000 × 1,000 mm is considered. As point inclusions we consider thermal protection elements recommended for the corresponding types of wall structures CP

230.1325800.2015 “Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities”³.

The initial data for the calculation are presented in Table 2, and on their basis the design indicators for the construction area are obtained (Table 3).

For three-layer wall constructions with FTCS cladding with external plaster layers as point heterogeneities, disc anchors with a plug providing hydro- and thermal insulation made of frost-resistant polyethylene are accepted, the steel spacer element has an anti-corrosion coating. When erecting a three-layer wall with a facing layer of face brick, flexible metal links

² CP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2012; 100.

³ CP 230.1325800.2015. Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2015; 72.

Table 2. Initial data for heat engineering calculation

Calculation parameter	Estimated value by CP 50.13330.2012
Humidity regime	Normal ²
Relative humidity of air inside the building ϕ_h , %	55 (according to CP 50)
Operating conditions of the structure	A (according to CP 50)
Air temperature of the coldest five-day period with a probability of 0.92 t_c , °C	−52 (according to CP 131)
Duration of the heating period with average daily outside air temperature not exceeding 8 °C t_h , days	252 (according to CP 131)
Average outdoor air temperature for the period with average daily outdoor air temperature not exceeding 8 °C t_{out} , °C	−20.6 (according to CP 131)
Estimated average indoor air temperature of the building premises for thermal protection t_m , °C	21
Heat transfer coefficients: • internal surface of structures α_{in} , W/(m ² ·°C); • external surface of structures with air gap α_{out} , W/(m ² ·°C); • external surface of structures without air gap α_{out} , W/(m ² ·°C)	8.7 (according to CP 50) 12 (according to CP 50) 23 (according to CP 50)

Table 3. Estimates for the construction area

Calculation parameter	Estimated value
Heating period degree-days (HPDD), °C·days/year	10,483.2
Normative value of the reduced heat transfer resistance of the enclosing structure R_o^{norm} , m ² ·°C/W	5.069
Basic value of the required heat transfer resistance of the envelope R_o^{req} , m ² ·°C/W	5.069

made of corrosion-resistant steel with a disc dowel are used to create a 40 mm thick ventilation gap. Aluminium reinforced brackets 150 mm high and 55 mm wide are used for fixing the curtain-type ventilated facade system. The brackets are fastened to the floor slabs.

Specific heat losses through point inclusions χ_k , W/°C, and their number per 1 m² n_k , pcs/m², for different types of construction are shown in Table 4, the data were determined based on the manufacturers' technical documentation and normative documentation CP 230.1325800.2015 "Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities".

To comply with the itemized requirement, the reduced heat transfer resistance of the heat shield fragment R_o^{req} , (m²·°C)/W, must be greater than the standard value R_o^{norm} , (m²·°C)/W (CP 50).

The reduced heat transfer resistance of a fragment of the heat-shielding shell without taking into ac-

count linear elements R_o^{req} , (m²·°C)/W is determined by the formula (CP 50):

$$R_o^{req} = \frac{1}{1/R_o^{rel} + \sum n_k \chi_k}, \quad (1)$$

where R_o^{rel} is the average conditional heat transfer resistance of a fragment of the enclosing structure, (m²·°C)/W.

The uniformity coefficient is calculated using the formula (CP 50):

$$r = R_o^{req}/R_o^{rel}. \quad (2)$$

Calculation of the structure for protection against overwatering

It is necessary to test the structure against overwatering to determine whether condensation will occur within the structure (CP 50). To ensure this requirement, the structure must be designed with a vapour permeabil-

Table 4. Estimated values for the construction area

Type of construction	Type of point inclusions	n_k , pcs/m ²	χ_k , W/°C
1.1	Disc anchors	6.7	0.001
1.2	Disc anchors	6.7	0.001
2.1	Flexible links	9.0	0.006
2.2	Flexible links	7.0	0.006
3.1	Brackets	0.56	0.079
	Disc anchors	6.94	0.001
3.2	Brackets	0.56	0.080
	Disc anchors	6.94	0.001

ity resistance of the internal layers (from the internal surface to the plane of maximum wetting) R_n , (m²·h·Pa)/mg, not less than the highest of the required vapour permeability values R_{n1}^{req} , R_{n2}^{req} , (m²·h·Pa)/mg, i.e. the requirements of (CP 50) must be met:

$$R_n > R_{n1}^{req};$$
$$R_n > R_{n2}^{req},$$

where R_{n1}^{req} — the required resistance to vapour permeability from the condition of inadmissibility of moisture accumulation in the building envelope for the annual period of operation; R_{n2}^{req} — the required resistance to vapour permeability from the condition of moisture limitation in the building envelope for the period with negative average monthly outdoor temperatures (CP 50).

Calculation of economic indicators of building envelopes

It is required to calculate the cost of production and total estimated cost of building envelopes.

We use for: determining the rates for materials index $K_m = 10,99^4$; rates for the operation of machines and mechanisms $K_{mo} = 18,34^5$; establishing rates for labour costs $K_s = 65,38^6$.

⁴ Approval of the Methodology for Determination of Estimated Prices for Materials, Products, Structures, Equipment and Service Prices for Cargo Transportation for Construction : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation of 20.12.2016 No. 1001/pr.
⁵ Cost rates for the operation of construction machinery and motor vehicles : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 26.12.2019 No. 876/pr.
⁶ Approval of the Methodology for Determination of Estimated Prices for Labour Costs of Employees in Construction : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 01.07.2022 № 534/pr.

The total estimated cost consists of direct costs, overheads and estimated profit. It is necessary to take into account expenses from payment of the value added tax (VAT). The amount of VAT is 20 % of the estimated cost.

Selection of the most efficient building envelope to ensure thermal protection of the building in a harsh climate condition

For the final comparative analysis, the load from 1 r. m. of the wall structure on the floor slab was calculated. The results of the calculations are shown in Table 5.

Structure 3.2 fulfils the mandatory element-by-element requirement, passes the test for protection against overwatering, the thickness of the structure is below average compared to the types of structures considered in this work. The load on the floor slabs exerted by the external wall is almost halved compared to structures with a ceramic brick facing layer.

RESEARCH RESULTS

The results of the thermal calculation of the considered structures are presented in Table 6.

Based on the calculations, it can be concluded that construction 2.1 with a structural and thermal insulation layer of expanded clay concrete and face brick cladding has the greatest thickness of the structure and the value of insulation above the average value by a factor of 1.23 and 1.13, respectively, with the present value of heat transfer resistance taking into account point inclusions being the smallest. Construction 3.1 also has a thickness of insulation above the average value of 1.13 times, and the reduced value of heat transfer resistance is the smallest of the considered constructions. On the basis of the analysis we can say that wall constructions made of expanded clay concrete blocks with air gap and facing with face brick, as well as facing with composite slabs on the curtain facade system are not recommended to be used in the considered conditions with

Table 5. Comparative analysis of designs

Type of construction	R_{n1}^{req}	R_{n2}^{req}	R_n	Moistening plane
1.1	0.671	2.446	2.334	Insulation layer (mineral wool slabs)
1.2	0.666	2.869	2.536	
2.2	2.160	1.752	2.549	
3.2	0.000	1.600	2.612	

Table 6. Results of thermal calculation

Type	Thickness of the structure δ_k , mm	Insulation thickness δ_{ut} , mm	R_o^{req} , (m ² ·°C)/W	Homogeneity coefficient for point inclusions r
1.1	595	150	5.687	0.96
1.2	485	130	5.425	0.96
2.1	730	200	5.225	0.72
2.2	640	180	5.424	0.78
3.1	592	200	5.105	0.73
3.2	522	200	5.323	0.74

Table 7. Calculation results for overwatering protection

Type of construction	R_{n1}^{req}	R_{n2}^{req}	R_n	Moistening plane
1.1	0.671	2.446	2.334	Insulation layer (mineral wool slabs)
1.2	0.666	2.869	2.536	
2.2	2.160	1.752	2.549	
3.2	0.000	1.600	2.612	

Table 8. Results of estimated calculation per 1 m²

Name of expenditure	Estimated cost in base price level, rub.	Estimated cost at current price level, rub.
Total direct costs	16,504	66,021
Total labour compensation fund (LCF)	388.62	25,408
Total overheads	436.86	28,562
Total estimated profit	245.02	16,019
Total for construction type 3.2 including VAT		132,724
Total direct costs	17,227.43	53,143.85
Total LCF	517.14	33,811
Total overheads	555.26	36,303
Total estimated profit	275.69	18,024
Total for construction type 4.2 including VAT		169,541

severe climate. Based on the data in Table 5, it can be seen that the FTCS structures have the smallest number of point thermal conductive inclusions, the structures are the most homogeneous.

In order to carry out further research, the constructions of type 2.1 and 3.1 should be excluded from the list of considered constructions. The results of the calculation for protection against overmoistening are given in Table 7.

Structures with FTCS finishes are not tested for protection against overwatering and do not fulfil the requirements for vapour permeability, therefore, moisture will accumulate in these structures. The zone of maximum wetting is in the layer of insulation: mineral wool HR, due to over-wetting the performance and thermal insulation properties of the insulation and plaster lining will be significantly reduced, which can lead to unfavourable conditions for human occupancy and increased heat losses through the structure. Considering the results, the structures cannot be used for operation in buildings and structures. For further research the constructions of type 1.1, 1.2 will not be used.

The results of calculation of the estimated cost of construction of the considered wall constructions are shown in Table 8.

The installation of a ceramic brick finishing layer is 21.7 % more efficient than the installation of a curtain-type ventilated facade system according to the local estimate.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the course of research work it was revealed that the best variant of construction for design from the point of view of thermal protection of the building in the conditions of severe climate is the construction from foam concrete blocks D600 with thickness of 300 mm with heat-insulating layer from mineral wool insulation HR120 with thickness of 200 mm with application of hinged facade system with finishing with composite panels and system of fastening to the inter-floor ceiling.

The construction with a facing layer of facing bricks has a higher weight and thickness. The construction from foam concrete blocks D600 with thickness of 300 mm with a thermal insulation layer of mineral wool insulation HR120 with thickness of 180 mm and a facing layer of ceramic bricks with a ventilated gap is 22 % more efficient than the construction 3.2 in terms of economic indicators, on this basis it is recommended to continue studying the possibility of using this type of construction for low-rise residential buildings in harsh climates.

Structures with foam concrete blocks and ceramic products can be used for construction of efficient building envelopes, thus it is recommended to continue studying the use of local resources for the production of these materials in order to increase the economic efficiency of structures. The limiting factor is the low culture of production of foam concrete blocks and, as a consequence, unstable thermal and strength characteristics of blocks even within one batch.

REFERENCES

1. Glikin S.M. *Modern enclosing structures and energy efficiency of buildings*. Moscow, 2003; 157. (rus.).
2. Adilhodzhayev A., Shaumarov S., Shipacheva E., Shermuhamedov U. New method for diagnostic of heat engineering and mechanical properties of cellular concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 9(1):6885-6887. DOI: 10.35940/ijeat.a2993.109119
3. Aleksandrovsky S.V. *Durability of external enclosing structures : monograph*. Moscow, NIISF RAASN, 2004; 322. EDN QNKKYB. (rus.).
4. Yasin Yu.D., Yasin V.Yu., Li A.V. Expanded polystyrene. Resource and aging of the material. Durability of structures. *Construction Materials*. 2002; 5:33-35. EDN IBEST. (rus.).
5. Khait V.L. Fundamental Science and Housing of the Future. *Housing Construction*. 2004; 10:4-5. EDN IXUGJH. (rus.).
6. Fokin V.M. *Fundamentals of energy saving and energy audit*. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006. EDN QMJGGF. (rus.).
7. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy efficient buildings*. Moscow, AVOK-press, 2003. 192. (rus.).
8. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings (2nd edition, corrected and supplemented)*. Moscow, AVOK, 2012; 204. EDN SXQNSV. (rus.).
9. Savin V.K. Construction physics. *Energy economics*. Moscow, Lazur, 2011; 415. EDN QNPJFL. (rus.).
10. Oparina L.A. Results of calculating the energy intensity of the life cycle of buildings. *Housing Construction*. 2013; 11:50. EDN RKVZMJ. (rus.).
11. Matrosov Yu.A. Energy saving in buildings. *The problem and its solutions : monograph*. Moscow, NIISF, 2008; 495. (rus.).
12. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Gushchin A.V. Air gap in multilayer enclosing structures with non-stationary heat and mass transfer. *Information environment of the University : Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference*. 2004; 676. (rus.).
13. Yun A.Ya. Analysis of efficiency of two-layer and one-layer heat insulation of ventilated facades. *Construction Materials*. 2017; 7:77. EDN ZCSLAD. (rus.).
14. Kosarev L.V., Boldyrev N.Yu., Kostyukova Yu.S., Dobrynina O.V., Bolshanov S.A. Selection of modern modifiers for construction of plaster facades of buildings in extreme north conditions. *Innovation & Investment*. 2021; 11:168-171. EDN COEXLW. (rus.).
15. Mestnikov A.E. Clay raw materials of Yakutia for the production of leaved leaf. *Modern High Technologies*. 2022; 3:30-34. DOI: 10.17513/snt.39069. EDN YSCCMS. (rus.).
16. Trepalina Yu., Kirillova N. Ceramic brick from Yakutia raw materials with the addition of ground cullet. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 4:138-143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465. EDN ZDDGHR. (rus.).
17. Osorova R.S., Kolesov M.V., Mikhailov D.A. Construction ceramics from raw materials of Yakutia with modifying additives. *Energy of the young — to the construction complex : collection of materials of the XI All-Russian scientific and technical conference*. 2017; 81-84 (rus.).
18. Egorova A.D., Osorova R.S., Sleptsova L.V., Dyachkovskaya E.S., Yadreeva Z.I. Relevance of organizing the production of ceramic bricks in Yakutia. *Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource conservation : collection of materials of the III All-Russian scientific and practical conference*. 2014; 247-250. EDN SSFJSL. (rus.).
19. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Fedorov V.I. Production and use of foam concrete of autoclave curing in conditions of Yakutia. *Fundamental Research*. 2015; 12-3:490-494. EDN VDFWPX. (rus.).
20. Rozhin V.N. *Foam concrete on a composite binder from raw materials of Yakutia : dis. ... cand. of technical sciences*. Belgorod, 2022; 165. EDN LULGGQ. (rus.).
21. Burenina O., Andreeva A., Savvinova M. Resources production of building materials in the republic of Sakha (Yakutia). *Innovations in Science*. 2017; 5(66):69-73. EDN YHQZQL. (rus.).
22. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasileva D.V. Rational use of Yakutia's mineral resources in construction materials technology. *Fundamental Research*. 2017; 12-1:80-84. EDN ZXPVTB. (rus.).
23. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103439. DOI: 10.1016/j.job.2021.103439

Received November 20, 2024.

Adopted in revised form on December 18, 2024.

Approved for publication on January 20, 2025.

B I O N O T E S: **Lyubov' Yu. Gnedina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 298544, Scopus: 57200283960, ResearcherID: AFN-6870-2022, ORCID: 0000-0002-3402-644X; GnedinaLYu@mgsu.ru.

Расчет сжатых тонкостенных стержней по действующим нормативно-техническим документам разных стран

Регина Артуровна Гатиатуллина, Александр Майорович Ибрагимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются методики определения расчетных значений несущей способности тонкостенного стержня, испытывающего деформацию сжатия, с учетом вероятной потери местной устойчивости по отечественным и европейским нормативным документам и по нормам Северной Америки.

Материалы и методы. Расчеты выполнены для тонкостенных холодногнутых С-образных стальных профилей. Использованы сбор и систематизация информационных данных, теоретическое обобщение материалов, полученных при анализе отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, сравнительный и сопоставительный анализы.

Результаты. Проведено сравнение методов определения несущей способности тонкостенных стержней с учетом их местной потери устойчивости. Алгоритмы расчетов представлены в табличной форме; результаты также сведены в таблицы.

Выводы. В ходе анализа результатов, приняв в качестве эталона для сравнения несущую способность, определенную в соответствии с СП 260.1325800.2016, получено расхождение с EN 1993-1-3 5 и 12 % — с AISI S100–16. Построены графики зависимости несущей способности от геометрических характеристик сечения (высоты, ширины и толщины профиля), что дает наглядное представление в разности подходов к разработке нормативно-технических документов в разных странах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сравнительный анализ, тонкостенные стержни, местная потеря устойчивости, методики расчета, сжатие, эффективная площадь, нормативные документы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гатиатуллина Р.А., Ибрагимов А.М. Расчет сжатых тонкостенных стержней по действующим нормативно-техническим документам разных стран // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.2

Автор, ответственный за переписку: Регина Артуровна Гатиатуллина, gatiatullina.regina@mail.ru.

Calculation of compressed thin-walled rods in accordance with current normative and technical documents of different countries

Regina A. Gatiatullina, Alexander M. Ibragimov

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

ABSTRACT

Introduction. The article deals with methods of determining the design values of the bearing capacity of a thin-walled rod experiencing compression deformation (taking into account the probable local buckling) according to domestic and European normative documents and the design standards of North America.

Materials and methods. Calculations for thin-walled cold-formed C-shaped steel sections were carried out. Methods such as collection and systematization of information data, theoretical generalization of materials obtained in the analysis of domestic and foreign normative and technical documents, comparative analysis were used.

Results. The comparison of methods for determining the load-bearing capacity of thin-walled rods under local buckling was made. The calculation algorithms are presented in tables. The results are summarized in unified tables.

Conclusions. Based on the analysis of results (taking as a reference for comparison the load-bearing capacity determined in accordance with SP 260.1325800.2016) a difference of 5 with EN 1993-1-3 and 12 % with AISI S100–16 was obtained. Graphs of correspondence between the load-bearing capacity and geometric characteristics of the cross-section (height, width and thickness) are shown. They give a visual representation of the difference in approaches to the development of normative and technical documents in different countries.

KEYWORDS: comparative analysis, thin-walled rods, local buckling, calculation methods, compression, effective area, normative documents

FOR CITATION: Gatiatullina R.A., Ibragimov A.M. Calculation of compressed thin-walled rods in accordance with current normative and technical documents of different countries. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.2

Corresponding author: Regina A. Gatiatullina, gatiatullina.regina@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Использование тонкостенных конструкций в строительстве обусловлено их универсальностью, быстровозводимостью, эффективностью и экономичностью.

Внедрение новых конструкций и технологий предполагает разработку и усовершенствование строительных норм, регламентирующих требования к данным конструкциям, материалам, к расчету и методам проектирования.

Одной из задач проекта пересмотра¹ СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования»², согласно которому в России производится проектирование элементов тонкостенных конструкций, является «повышение уровня гармонизации нормативных требований с международными нормативными документами». Для этого необходимо провести сравнительный анализ положений документов EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting³ и AISI S100–16 «North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members»⁴. Предлагается целесообразным подвергнуть тщательному анализу раздел расчета на несущую способность и местную устойчивость стальных тонкостенных конструкций.

В результате сжатия тонкостенного стержня наблюдается потеря местной устойчивости (local buckling), которая возникает из-за местных деформаций отдельных участков и может предшествовать потере общей устойчивости (global buckling) [1]. При этом узловые перемещения относительно малы.

При такой потере устойчивости продольная ось элемента остается недеформированной. Деформация поперечного сечения происходит за счет изгиба

внутренних стенок элемента. Внешние стенки имеют смещения. Местная потеря устойчивости стержня зависит от того, какой из элементов сечения наиболее склонен к смятию [2–5].

Eurocode определяет предельную прочность элемента путем расчета эффективной ширины элементов сечения (стенки, полки и ребра жесткости/кромки). Далее эффективная ширина уменьшается на основе смятия/потери устойчивости ребра жесткости.

Аналитическая модель идеализированной сжатой полки аналогична модели балки-колонны на упругом фундаменте [6–10].

AISI — стандарты проектирования для Америки, Канады и Мексики.

Принцип проектирования, используя метод эффективной ширины (Effective Width Method), предложенный Теодором фон Карманом [11] и позже модифицированный Джорджем Винтером [12], служит основным и достаточным для установления несущей способности тонкостенных стержней с учетом потери местной устойчивости.

Дополнительно для проектирования холодноформованных элементов, испытывающих деформацию сжатия, согласно текущей североамериканской спецификации AISI S100–16, применяется Direct Strength Method (метод прямой прочности), разработанный Беном Шефером [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первый этап расчета тонкостенных профилей — проверка отношений ширины и высоты элементов сечения к толщине. Действительные значения не должны превышать максимальные, установленные нормами (табл. 1).

На рис. 1 изображено поперечное сечение С-образной стальной балки.

Наблюдаются расхождения в предельных значениях геометрических размеров и диапазонах толщин, установленных в отечественных и зарубежных нормах, возможной причиной чего является то факт, что данные параметров определяются опытным способом.

На результаты экспериментов влияют:

- свойства материала (разные производители, разное качество);
- география — сейсмическая активность, снеговая и ветровая нагрузки;
- применение различных вычислительных комплексов.

Так как каждый из факторов меняется в зависимости от места проведения исследований, отно-

¹ Пояснительная записка к проекту пересмотра СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» (первая ред.). М. : Минстрой России, 2022. 7 с.

² СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М. : Минстрой России, 2016. 114 с.

³ EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, 2006. 130 p.

⁴ AISI S100–16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington : American Iron and Steel Institute, 2020. 505 p.

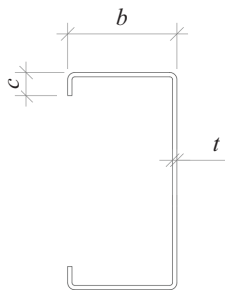


Рис. 1. Характерные размеры тонкостенного стержня открытого профиля

шения размеров профилей имеют разные граничные значения.

Второй этап — поправка геометрических характеристик сечения на закругления в углах контура (рис. 2).

Считается, что местной потере устойчивости подвержены прямолинейные участки сечения, заключенные между углами сгиба.

Определяется радиус изгиба $r_m = R + t/2$, где R — радиус закругления; t — толщина профиля. Далее — уменьшенный радиус изгиба $g_r = r_m \cdot (\operatorname{tg}\varphi/2 - \sin\varphi/2)$ или расстояние от точки пересечения двух срединных линий стенки и полки балки X до реальной точки пересечения P .

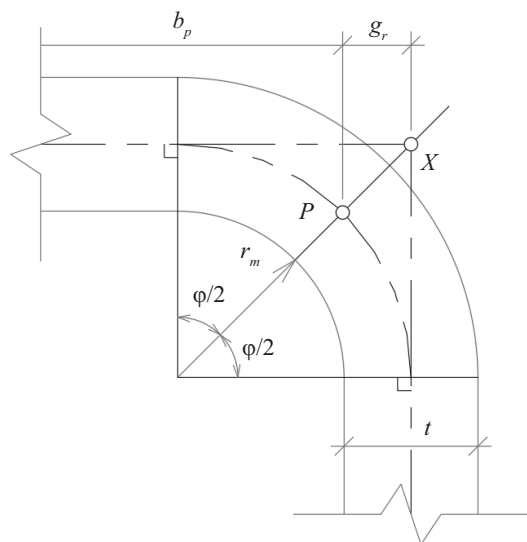


Рис. 2. Закругленный угол тонкостенного стального профиля и средняя точка сгиба

Во всех методиках расчета возможная потеря местной устойчивости учитывается исключением из работы части полки и (или) стенки через безразмерный коэффициент редуцирования ρ [15–20].

Следующие этапы расчета представлены в табл. 2.

Табл. 1. Максимальные значения отношений ширины и высоты элементов сечения к толщине

СП 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100–16
Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования	Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting	North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
$b/t \leq 100;$ $c/t \leq 40$	$b/t \leq 60;$ $c/t \leq 50$	$b/t \leq 90$ (при $I_s \geq I_a$); $b/t \leq 60$ (при $I_s < I_a$), где I_s — нередуцированный момент инерции элемента жесткости (кромки) относительно собственной центральной оси, параллельной усиливаемому элементу; I_a — момент инерции кромки (достаточный, чтобы каждый компонент вел себя как элемент жесткости) $c/t \leq 60$
Для обеспечения необходимой жесткости и исключения преждевременной потери устойчивости элемента жесткости:		
$0,2 \leq c/b \leq 0,5$	$0,2 \leq c/b \leq 0,6$	$c/b \leq 0,7$
Расчетная толщина стали (принимается равной скорректированной — за вычетом толщины цинкового или другого покрытия):		
$0,5 \text{ мм} \leq t_{cor} \leq 4 \text{ мм}$	$0,45 \text{ мм} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ мм}$	Не более 2,997 мм

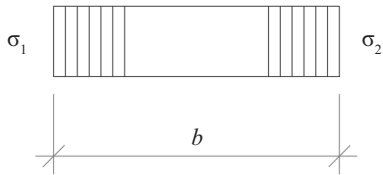


Рис. 3. Распределение напряжения, при котором $\psi = 1$ (положительное сжатие)

Распределение напряжения, при котором $\psi = 1$ (положительное сжатие), показано на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения расчетов выбраны профили согласно ТУ 112000-001-12586100-2009 «Профили стальные гнутые для легких стальных конструкций»⁵. Значения эффективных площадей и несущих способностей для различных типоразмеров сечений представлены в табл. 3–5. Отследить зависимость несущей способности от высоты тонкостенного

⁵ ТУ 112000-001-12586100–2009. Профили стальные гнутые для легких стальных конструкций. Челябинск : ЧелябПСК, 2009. 37 с.

Табл. 2. Расчет несущей способности с учетом местной потери устойчивости по нормативным документам разных стран

СП 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100–16
Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования	Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting	North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
Третий этап — определение эффективной площади сечения		
Эффективная ширина рассчитывается для всех частей сечения, в которых действуют напряжения сжатия от действия осевой силы, путем умножения геометрической ширины на понижающий коэффициент ρ . Этот коэффициент принимает во внимание гибкость пластины, ее расчетную схему и распределение напряжений в сечении		
1.1. Гибкость пластины (buckling slenderness)		
$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{28,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$	$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$	$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}};$ $F_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2$
где $R_y \equiv f_y$ — предел текучести, Н/мм ² ; σ_{cr} — критическое напряжение потери устойчивости пластины в упругой стадии, Н/мм ² ; b — соответствующая ширина сжатой части сечения, мм; t — толщина стального листа, мм		где F_{cr} — напряжение потери устойчивости, Н/мм ² ; E — модуль Юнга, Н/мм ² ; $\mu = 0,3$ — коэффициент Пуассона; t — толщина стального листа, мм; w — соответствующая ширина сжатой части сечения
Коэффициент $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}}$	Коэффициент $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	Данная методика новый коэффициент не вводит
$k_\sigma \equiv k$ — коэффициент, учитывающий характер потери устойчивости в зависимости от отношения напряжений $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ (см. рис. 3)		
1.2. Понижающий коэффициент (reduction factor)		
$\lambda = 0,673$ — предельное значение гибкости, ниже которого местная потеря устойчивости не происходит и поэтому не влияет на несущую способность сечения. Таким образом, при $\lambda \leq 0,673$, $\rho = 1$		
При $\lambda > 0,673$ $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2}$ для стенки и полки при $k_\sigma = 4$; $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,188}{\overline{\lambda}_p^2}$ для кромки/жесткого элемента при $k_\sigma = 0,43$	При $\lambda > 0,673$ $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2}$ для стенки и полки при $k_\sigma = 4$; $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,188}{\overline{\lambda}_p^2}$ для кромки/жесткого элемента при $k_\sigma = 0,43$	При $\lambda > 0,673$ $\rho = \frac{(1 - 0,22)/\lambda}{\lambda}$ для всех элементов сечения

Строительство. Том 15. Выпуск 3 (57)
наука и образование

СП 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100-16
1.3. Эффективные размеры (effective widths) Умножение понижающего коэффициента на соответствующую геометрическую ширину		
$h_{ef} = \rho \cdot h_w;$ $b_{ef} = \rho \cdot b_p;$ $c_{ef} = \rho \cdot b_{p,c}.$	$h_{eff} = \rho \cdot h_w;$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p;$ $c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c}.$	$h_{eff} = \rho \cdot h_w;$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p;$ $c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c}.$
1.4. Эффективная площадь сечения (effective area)		
$A_{ef,n} = (h_{ef} + 2 \cdot b_{ef} + 2 \cdot c_{ef}) \cdot t$	$A_{eff} = (h_{eff} + 2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot c_{eff}) \cdot t$	$A_{eff} = (h_{eff} + 2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot c_{eff}) \cdot t$
Четвертый этап — несущая способность		
—	—	Напряжение при потере устойчивости (в упругой стадии): $F_{cre} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(KL/r)^2},$ где $K = 1$ — коэффициент эффективной длины (effective length factor); L — длина элемента, мм; r — радиус инерции, мм
—	—	$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}},$ где F_y — предел текучести, Н/мм ²
—	—	Если $\lambda_c < 1,5$, сжимающее напряжение: $F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y$
—	—	Номинальное сопротивление (nominal resistance): $P_{nl} = A_{eff} \cdot F_n$
$A_{ef,n} \cdot R_y \cdot \gamma_c$	$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$	$P_{ne} = \phi_c \cdot P_{nl}$
где $\gamma_c = 0,95$ — коэффициент условия работы для балок из одиночных гнутых профилей С-образных сечений	где $\gamma_{M0} = 1,00$ — частный коэффициент безопасности при определении сопротивления поперечных сечений независимо от класса. γ_{M0} представляет собой сопротивление поперечных сечений чрезмерной деформации и в общей редакции нормативного документа при проектировании зданий принимается равным 1	где $\phi_c = 0,85$ — коэффициент нагрузки и сопротивления (метод LRFD — Load and Resistance Factor Design)

сечения можно на рис. 4, от ширины сечения — на рис. 5, от толщины сечения — на рис. 6.

1. Метод расчета прочностных характеристик по СП 260.1325800.2016 и EN 1993-1-3: 2006 является идентичным. Разница значений несущей способности одинаковых профилей составляет 5 %. Она обусловлена коэффициентами: $\gamma_c = 0,95$ — по СП и $\gamma_{M0} = 1$ — по EN.

2. Иной способ, представленный в AISI S100-16, дает следующие расхождения:

Табл. 3. Результаты вычислений эффективной площади и несущей способности нескольких типоразмеров С-образных профилей с разной высотой сечения

Номер	h , мм	b , мм	c , мм	t , мм	Эффективная площадь A_{eff} , мм ²			Несущая способность, Н		
					СП	EN	AISI	СП	EN	AISI
1	150	50	14	1,2	202,02		200,94	53 738,16	56 566,48	47 011,08
2	200	80	20		231,15		227,72	61 487,13	64 723,30	53 706,29
3	300	80	20		235,20		229,47	62 563,09	65 855,88	54 370,66
4	350	100	25		239,06		238,10	63 589,71	66 936,54	56 487,10
5	400	100	25		241,71		238,47	64 293,99	67 677,88	56 603,87

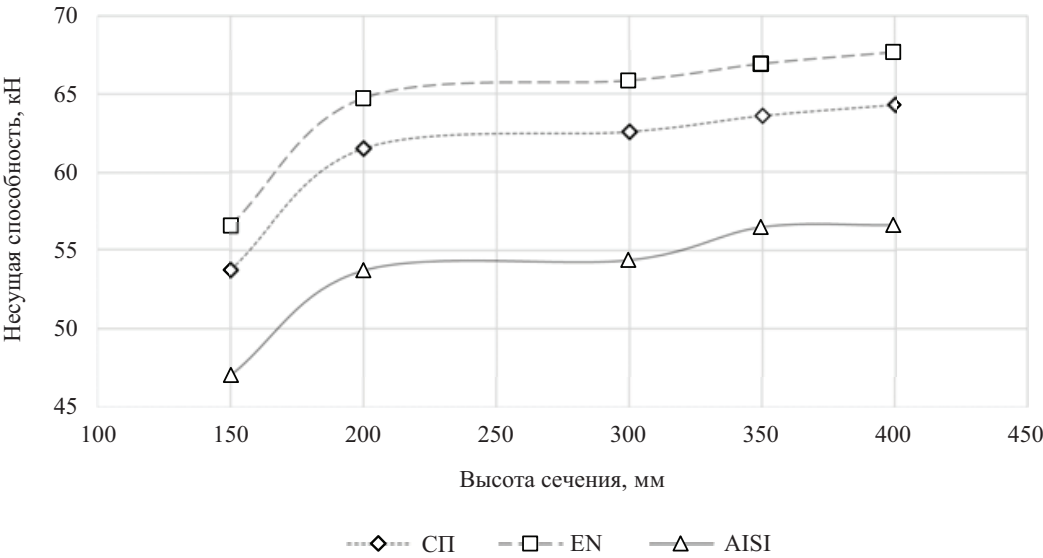


Рис. 4. График зависимости несущей способности тонкостенного стержня от высоты сечения

Табл. 4. Результаты вычислений эффективной площади и несущей способности нескольких типоразмеров С-образных профилей с разной шириной полки

Номер	h, мм	b, мм	c, мм	t, мм	Эффективная площадь A_{eff} , мм ²			Несущая способность, Н		
					СП	EN	AISI	СП	EN	AISI
1	300	60	15	3	736,24		804,38	214 815,81	226 121,90	190 594,27
2		80	20		856,24		954,38	254 715,81	268 121,90	226 116,31
3		100	25		976,24		1104,38	294 615,81	310 121,90	261 742,29

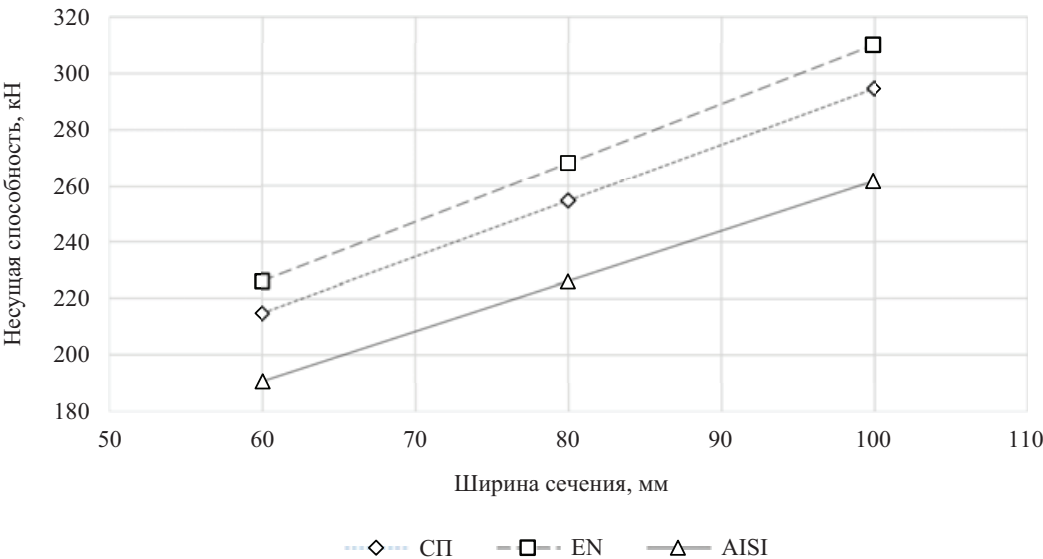


Рис. 5. График зависимости несущей способности тонкостенного стержня от ширины сечения

Табл. 5. Результаты вычислений эффективной площади и несущей способности нескольких типоразмеров С-образных профилей разных толщин

Номер	h, мм	b, мм	c, мм	t, мм	Эффективная площадь A_{eff} , мм ²			Несущая способность, Н		
					СП	EN	AISI	СП	EN	AISI
1	300	80	20	1,2	235,20		229,47	62 563,09	65 855,88	54 370,66
2				2	551,46		548,44	146 688,26	154 408,70	128 233,41
3				3	856,24		954,38	254 715,81	268 121,90	226 116,31
4				4	1370,79		1392,38	364 629,07	383 820,07	328 300,90

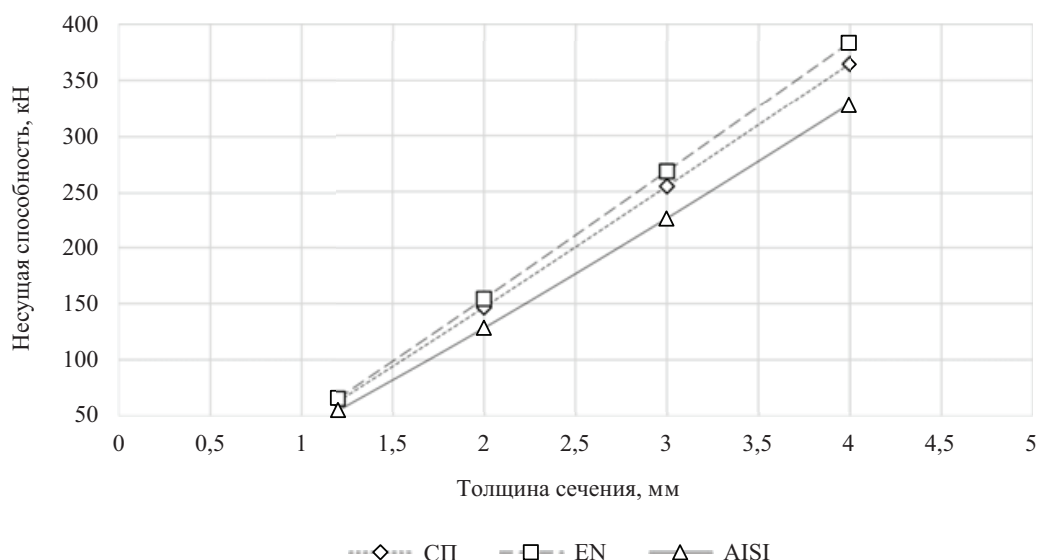


Рис. 6. График зависимости несущей способности тонкостенного стержня от толщины сечения

- 1) значений эффективной площади: 0,54–1,49 %;
- 2) значений несущей способности:
 - с СП: 11,96–12,65 %; с EN: 16,36–17,02 % — при изменении высоты сечения;
 - с СП: 11,15–11,28 %; с EN: 15,60–15,71 % — при изменении ширины сечения;
 - с СП: 9,96–13,09 %; с EN: 14,46–17,44 % — при изменении толщины сечения.

Такие существенные расхождения обусловлены применением коэффициента сопротивления φ_c (resistance factor), который применяется в методике AISI S100–16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе изучения нормативных документов России, Европы и Северной Америки, регламентирующих правила проектирования и методы расчета тонкостенных стержней, получены следующие выводы.

СП 260.1325800.2016, частично гармонизированный с европейскими нормативными документами (EN 1993-1-3: 2006), имеет существенные отличия от AISI S100–16: в терминологии, стилистике, оформлении, изложении и подаче технического текста, в выборе теоретических формул и параметров.

Высота сечения тонкостенного стержня несущественно влияет на его несущую способность, так как значительная ее часть вырезается. При увеличении ширины (высоты) стенки в 2 раза (с 200 до 400 мм) несущая способность профиля по СП и EN увеличивается на 4,4 %, по AISI — на 5,1 %.

При увеличении ширины полки в 1,7 раз (с 60 до 100 мм), исходя из сортамента технических условий⁵, несущая способность профиля по СП и EN увеличивается на 32,7 %, по AISI — на 37,2 %. Зависимость между несущей способностью тонкостен-

ного стержня и толщиной его сечения — линейная (см. рис. 5).

Увеличение толщины сечения (например, в 2 раза) приводит к очевидному резкому повышению несущей способности (по СП и EN увеличивается на 148,30 %, по AISI — на 156,25 %). Зависимость между несущей способностью тонкостенного стержня и толщиной его сечения стремится к линейной (см. рис. 6).

Расчеты тонкостенных стержней при сжатии по СП 260.1325800.2016 и EN 1993-1-3 аналогичны расчетам элементов обычных стальных конструкций, представленным в СП 16.13330.2017⁶ и EN 1993-1-1⁷. Единственным отличием является использование эффективной площади сечения (для тонкостенных профилей) вместо площади сечения нетто. Методика расчета сжатых тонкостенных стержней по нормам Северной Америки AISI S100-16 на четвертом этапе (см. табл. 2) учитывает расчетную длину и предельную гибкость стержня, что дает более достоверные результаты. Показатели несущей способности профиля по AISI S100-16 всегда ниже, чем по СП 260.1325800.2016 и EN 1993-1-3, т.е. на этапе проектирования закладывается большая механическая безопасность конструкции. Таким образом, с целью актуализации отечественной нормативно-технической базы имеет место обращение к опыту конструирования и расчета в других странах.

⁶ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М. : Минстрой России, 2017. 140 с.

⁷ EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2005. 91 p.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кинзябулатова Д.Ф., Порываев И.А., Недосеко И.В. Расчет устойчивости сжатых тонкостенных стержней С-образного сечения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4 (62). С. 108–118. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_108. EDN JLMWXF.
2. Егоров А.В., Егоров В.Н. Расчетно-экспериментальное исследование продольной устойчивости конструкции тонкостенного плоского стержня // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 3 (135). DOI: 10.18698/2308-6033-2023-3-2256. EDN VFTQTU.
3. Чернявский И.Д. К устойчивости формы сечения стальных тонкостенных стержней из холодногнутого профиля типа «сигма» // Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов: в 2 частях. Брест : БрГТУ, 2022. Ч. 1. С. 310–314.
4. Советников Д.О., Азаров А.А., Иванов С.С., Рыбаков В.А. Методы расчета тонкостенных стержней: статика, динамика, устойчивость // Alfabuild. 2018. № 2 (4). С. 7–33. DOI: 10.34910/ALF.4.1
5. Zhang P., Shahria Alam M. Compression tests of thin-walled cold-formed steel columns with Σ -shaped sections and patterned perforations distributed along the length // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 174. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109082
6. Туснина О.А. Особенности работы тонкостенного холодногнутого прогона С-образного сечения // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 64–74. EDN SWJDYN.
7. Schafer B.W., Peköz T. The behavior and design of longitudinally stiffened thin-walled compression elements // Thin-Walled Structures. 1997. Vol. 27. Issue 1. Pp. 65–78. DOI: 10.1016/0263-8231(96)00016-x
8. Каюмов Р.А. Закрытое поведение сжатых стержней с нелинейно упругими опорами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 3. С. 23–31. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.03. EDN OERASD.
9. Rybakov V.A., Lalin V.V., Ivanov S.S., Azarov A.A. Coordinate functions quadratic approximation in V.I. Slivker's semi-shear stability theory // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 5 (89). Pp. 115–128. DOI: 10.18720/MCE.89.10. EDN VJZIUK.
10. Ходева В.А. Устойчивость тонкостенной пластины в пределах упругости // Молодой исследователь Дона. 2022. № 5 (38). С. 61–65. EDN HIVJPU.
11. Von Karman T., Sechler E.E., Donnell L. The strength of thin plates in compression // Journal of Fluids Engineering. 1932. Vol. 54. Issue 2. Pp. 53–56. DOI: 10.1115/1.4021738
12. Winter G. Strength of thin steel compression flange // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1947. Vol. 112. Issue 1. Pp. 527–554. DOI: 10.1061/TACEAT.0006092
13. Schafer B.W., Peköz T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // Journal of Constructional Steel Research. 1998. Vol. 47. Issue 3. Pp. 193–210. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00007-8
14. Torabian S., Schafer B.W. Development and Experimental Validation of the Direct Strength Method for Cold-Formed Steel Beam-Columns // Journal of Structural Engineering. 2018. Vol. 144. Issue 10. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002117
15. Anbarasu M. Structural performance of cold-formed steel composite beams // Steel and Composite Structures. 2018. Vol. 27. Issue 5. DOI: 10.12989/scs.2018.27.5.545
16. Зеньков Е.В. Особенности работы стоечного профиля из легких стальных тонкостенных конструкций на устойчивость // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 3–1 (105). С. 54–59. DOI: 10.23670/IRJ.2021.105.3.009. EDN QKEEVM.
17. Надольский В.В., Дергачев М.Г. Метод эффективной ширины для тонкостенных холодноформованных элементов согласно требованиям Еврокода 3 // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2017. № 8. С. 105–111. EDN ZVZCYH.
18. Zhang P., Shahria Alam M. Experimental investigation and numerical simulation of pallet-rack stub columns under compression load // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 133. Pp. 282–299. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.02.023
19. Jovanovic D., Zarkovic D., Dobric J. Design and application of cold-formed thin-walled members // Planning, design, construction and building renewal: scientific conference. 2018. Pp. 125–134.
20. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel // Steel Construction. 2022. Vol. 15. Issue 1. Pp. 43–47. DOI: 10.1002/stco.202100051

Поступила в редакцию 20 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 20 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Регина Артуровна Гатиатуллина — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; gatiatullina.regina@mail.ru;

Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID: 0000-0003-3761-9213; IbragimovAM@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Гатиатулина Р.А. — выполнение и анализ расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ибрагимов А.М. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The use of thin-walled structures in construction is due to their versatility, quick assembly, efficiency and cost-effectiveness.

The introduction of new structures and technologies requires the development and improvement of building codes that regulate the requirements for these structures, materials, calculations, and design methods.

One of the tasks of the project to revise¹ CP 260.1325800.2016 “Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design rules”², according to which the design of thin-walled structural elements is carried out in Russia, is “to increase the level of harmonization of regulatory requirements with international regulatory documents”. To this end, it is necessary to conduct a comparative analysis of the provisions of EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting³ and AISI S100–16 “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members”⁴. It seems appropriate to carefully analyze the section on the calculation of the load-bearing capacity and local stability of thin-walled steel structures.

Compression of a thin-walled rod results in local buckling, which occurs due to local deformations of individual sections and may precede global buckling [1]. In this case, the nodal displacements are relatively small.

With such a loss of stability, the longitudinal axis of the element remains undeformed. The deformation of the cross-section occurs due to the bending of the inner walls of the element. The outer walls have displace-

ments. The local loss of stability of the rod depends on which of the cross-section elements is most prone to crushing [2–5].

Eurocode determines the ultimate strength of an element by calculating the effective width of the cross-section elements (walls, shelves and stiffeners/edges). The effective width is then reduced based on the buckling/loss of stability of the stiffener.

The analytical model of an idealized compressed flange is similar to the model of a beam-column on an elastic foundation [6–10].

AISI — design standards for America, Canada and Mexico.

The design principle using the Effective Width Method, proposed by Theodore von Kármán [11] and later modified by George Winter [12], serves as the basis and is sufficient for establishing the load-bearing capacity of thin-walled rods, taking into account the loss of local stability.

Additionally, for the design of cold-formed members experiencing compression deformation, the Direct Strength Method developed by Ben Schaefer [13, 14] is used in accordance with the current North American specification AISI S100–16.

MATERIALS AND METHODS

The first stage of calculating thin-walled profiles is to check the ratio of the width and height of the cross-section elements to the thickness. The actual values must not exceed the maximum values established by the standards (Table 1).

Fig. 1 shows a cross-section of a C-shaped steel beam.

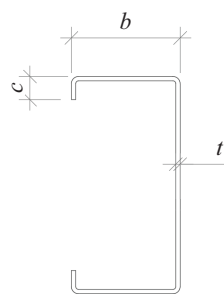


Fig. 1. Characteristic dimensions of a thin-walled open profile rod

¹ Explanatory note to the draft revision of CP 260.1325800.2016 “Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design rules” (first edition). Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2022; 7.

² CP 260.1325800.2016. Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design rules. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016; 114.

³ EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, 2006; 130.

⁴ AISI S100–16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, American Iron and Steel Institute, 2020; 505.

Table 1. Maximum values of the width and height of cross-section elements in relation to thickness

CP 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100–16
Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design rules	Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting	North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
$b/t \leq 100$; $c/t \leq 40$	$b/t \leq 60$; $c/t \leq 50$	$b/t \leq 90$ (if $I_s \geq I_a$); $b/t \leq 60$ (if $I_s < I_a$), where I_s is the unreduced moment of inertia of the stiffening member (edge) relative to its own central axis parallel to the member being stiffened; I_a is the moment of inertia of the edge (sufficient for each component to behave as a stiffening member) $c/t \leq 60$
To ensure the necessary stiffness and prevent premature loss of stability of the stiffening element		
$0.2 \leq c/b \leq 0.5$	$0.2 \leq c/b \leq 0.6$	$c/b \leq 0.7$
Calculated steel thickness (taken to be equal to the adjusted thickness minus the thickness of the zinc or other coating)		
$0.5 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 4 \text{ mm}$	$0.45 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm}$	No more than 2.997 mm

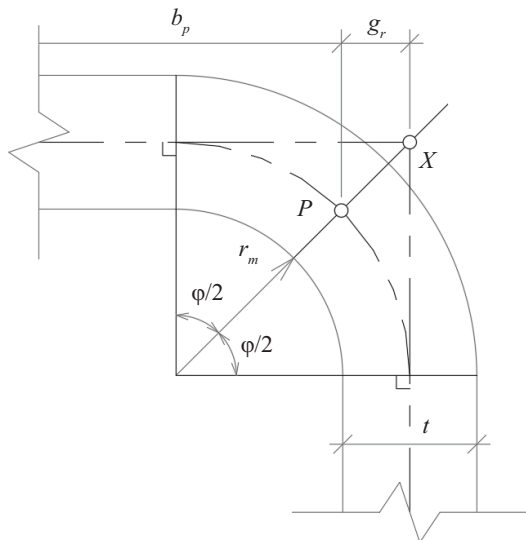


Fig. 2. Rounded corner of a thin-walled steel profile and the mid-point of the bend

There are discrepancies in the limit values of geometric dimensions and thickness ranges established in domestic and foreign standards, which may be due to

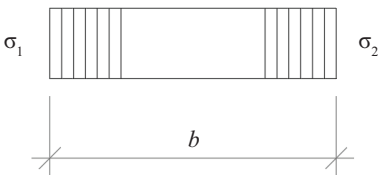


Fig. 3. Stress distribution at which $\psi = 1$ (positive compression)

the fact that these parameters are determined experimentally.

The results of the experiments are influenced by:

- material properties (different manufacturers, different quality);
- geography — seismic activity, snow and wind loads;
- the use of different computing systems.

Since each of these factors varies depending on the location of the research, the profile size ratios have different boundary values.

The second stage is the correction of the geometric characteristics of the cross-section for rounding at the corners of the contour (Fig. 2).

Table 2. Calculation of bearing capacity taking into account local loss of stability according to regulatory documents of different countries

CP 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100–16
Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design rules	Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting	North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
Stage three — determining the effective cross-sectional area		
The effective width is calculated for all parts of the cross-section in which compressive stresses from the axial force are present by multiplying the geometric width by a reduction factor ρ . This factor takes into account the flexibility of the plate, its design scheme and the distribution of stresses in the cross-section		
1.1. Plate flexibility (buckling slenderness)		

CP 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100-16
$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{28.4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$	$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$	$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}};$ $F_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2$
where $R_y \equiv f_y$ — yield strength, N/mm ² ; σ_{cr} — critical stress of plate instability in the elastic stage, N/mm ² ; b — corresponding width of the compressed part of the section, mm; t — thickness of steel sheet, mm		where F_{cr} is the stress at loss of stability, N/mm ² ; E is Young's modulus, N/mm ² ; $\mu = 0.3$ is Poisson's ratio; t is the thickness of the steel sheet, mm; w is the corresponding width of the compressed part of the cross-section
Coefficient $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}}$	Coefficient $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	This method does not introduce a new coefficient

$k_\sigma \equiv k$ — coefficient that takes into account the nature of stability loss depending on the stress ratio $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ (see Fig. 3)

1.2. Reduction factor

$\lambda = 0.673$ — the limit value of flexibility below which local loss of stability does not occur and therefore does not affect the load-bearing capacity of the section. Thus, when $\lambda \leq 0.673$, $\rho = 1$

When $\lambda > 0.673$ $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2}$ for the wall and shelf at $k_\sigma = 4$; $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0.188}{\overline{\lambda}_p^2}$ for the edge/rigid element at $k_\sigma = 0.43$	When $\lambda > 0.673$ $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2}$ for the wall and shelf at $k_\sigma = 4$; $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0.188}{\overline{\lambda}_p^2}$ for edge/rigid element at $k_\sigma = 0.43$	When $\lambda > 0.673$ $\rho = \frac{(1 - 0.22)/\lambda}{\lambda}$ for all cross-section elements
---	--	---

1.3. Effective widths

Multiply the reduction factor by the corresponding geometric width

$h_{ef} = \rho \cdot h_w;$ $b_{ef} = \rho \cdot b_p;$ $c_{ef} = \rho \cdot b_{p,c'}$	$h_{eff} = \rho \cdot h_w;$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p;$ $c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c'}$	$h_{eff} = \rho \cdot h_w;$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p;$ $c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c'}$
--	---	---

1.4. Effective cross-sectional area

$A_{ef,n} = (h_{ef} + 2 \cdot b_{ef} + 2 \cdot c_{ef}) \cdot t$	$A_{eff} = (h_{eff} + 2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot c_{eff}) \cdot t$	$A_{eff} = (h_{eff} + 2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot c_{eff}) \cdot t$
---	---	---

Stage four — load-bearing capacity

—	—	Stress at loss of stability (in the elastic stage): $F_{cre} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(KL/r)^2},$ where $K = 1$ — effective length factor; L — element length, mm; r — radius of inertia, mm
—	—	$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}},$ where F_y — yield strength, N/mm ²
—	—	If $\lambda_c < 1.5$, compressive stress: $F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y$
—	—	Nominal resistance: $P_{nl} = A_{eff} \cdot F_n$
$A_{ef,n} \cdot R_y \cdot \gamma_c$	$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$	$P_{ne} = \varphi_c \cdot P_{nl}$

End of the Table 2

CP 260.1325800.2016	EN 1993-1-3: 2006	AISI S100–16
where $\gamma_c = 0.95$ — operating condition coefficient for beams made of single bent profiles with C-shaped cross-sections	where $\gamma_{M0} = 1.00$ — partial safety factor when determining the resistance of cross-sections regardless of class. γ_{M0} represents the resistance of cross-sections to excessive deformation and, in the general version of the regulatory document, is taken to be equal to 1 when designing buildings	where $\varphi_c = 0.85$ — load and resistance factor (LRFD method — Load and Resistance Factor Design)

It is believed that straight sections of the cross-section enclosed between the bending corners are susceptible to local loss of stability.

The bending radius is determined as $r_m = R + t/2$, where R is the radius of curvature and t is the thickness of the profile. Next, the reduced bending radius is determined as $g_r = r_m \cdot (\operatorname{tg}\varphi/2 - \sin\varphi/2)$, or the distance from the point of intersection of the two centre lines of the wall and the beam flange X to the actual point of intersection P .

In all calculation methods, the possible loss of local stability is taken into account by excluding part of the shelf and/or wall from the calculation using a dimensionless reduction coefficient ρ [15–20].

The following calculation steps are presented in Table 2.

The stress distribution at which $\psi = 1$ (positive compression) is shown in Fig. 3.

RESEARCH RESULTS

For the calculations, profiles were selected in accordance with TS 112000-001-12586100–2009 “Bent steel profiles for light steel structures”⁵.

⁵ TS 112000-001-12586100–2009. Bent steel profiles for light steel structures. Chelyabinsk, ChelyabPSK, 2009; 37.

Table 3. Results of calculations of the effective area and load-bearing capacity of several standard sizes of C-shaped profiles with different section heights

Number	h , mm	b , mm	c , mm	t , mm	Effective area A_{eff} , mm ²			Load capacity, N		
					CP	EN	AISI	CP	EN	AISI
1	150	50	14	1.2	202.02		200.94	53,738.16	56,566.48	47,011.08
2	200	80	20		231.15		227.72	61,487.13	64,723.30	53,706.29
3	300	80	20		235.20		229.47	62,563.09	65,855.88	54,370.66
4	350	100	25		239.06		238.10	63,589.71	66,936.54	56,487.10
5	400	100	25		241.71		238.47	64,293.99	67,677.88	56,603.87

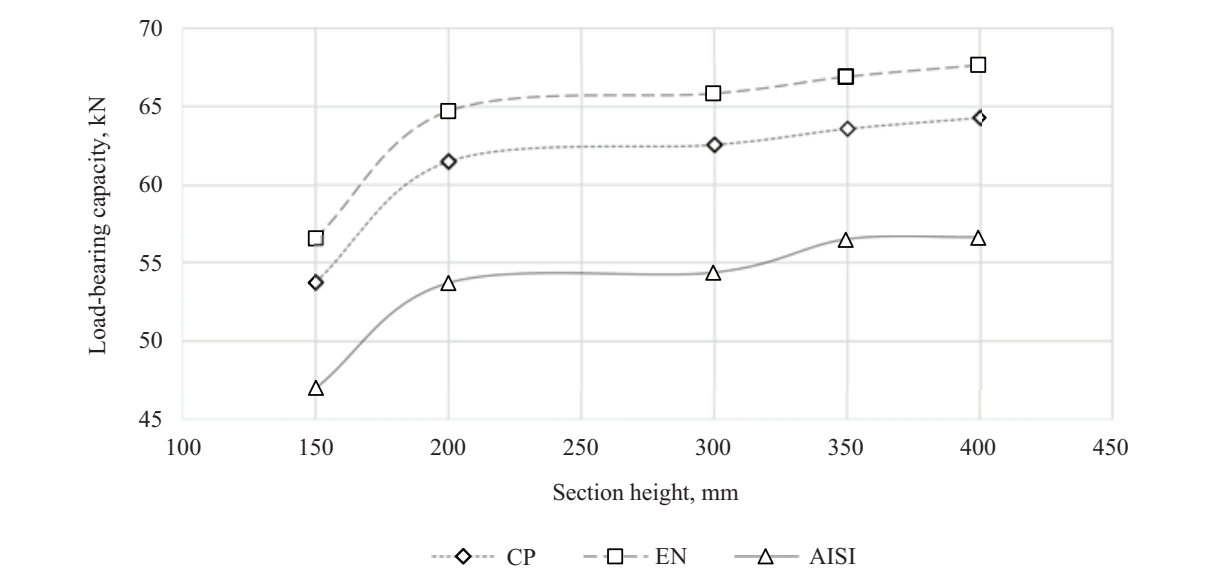


Fig. 4. Graph showing the dependence of the load-bearing capacity of a thin-walled rod on the height of the cross-section

Table 4. Results of calculations of the effective area and load-bearing capacity of several standard sizes of C-shaped profiles with different shelf widths

Number	<i>h</i> , mm	<i>b</i> , mm	<i>c</i> , mm	<i>t</i> , mm	Effective area A_{eff} , mm ²			Load capacity, N		
					CP	EN	AISI	CP	EN	AISI
1	300	60	15	3	736.24		804.38	214,815.81	226,121.90	190,594.27
2		80	20		856.24		954.38	254,715.81	268,121.90	226,116.31
3		100	25		976.24		1,104.38	294,615.81	310,121.90	261,742.29

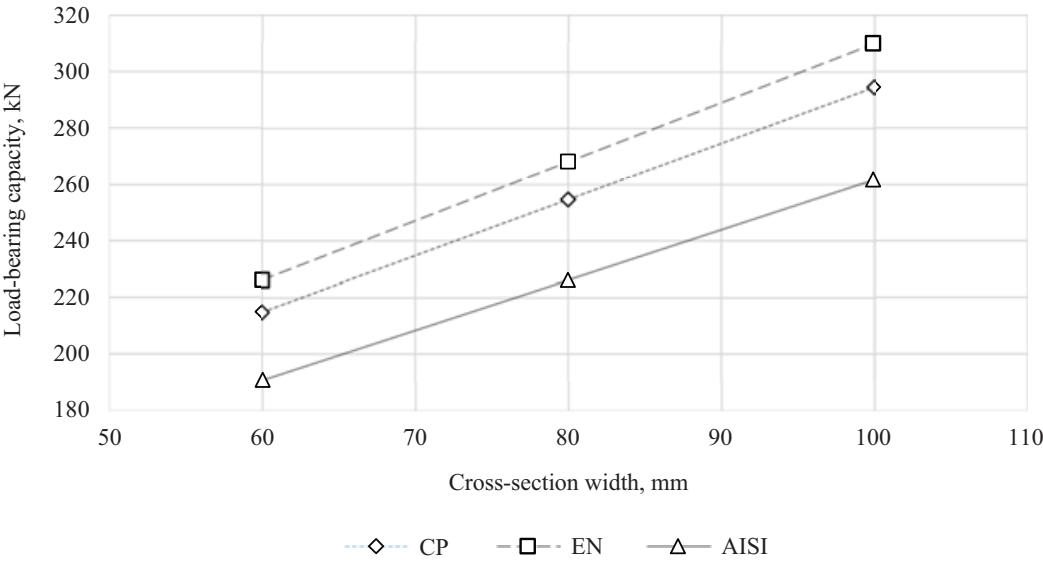


Fig. 5. Graph showing the dependence of the load-bearing capacity of a thin-walled rod on the width of the cross-section

Table 5. Results of calculations of the effective area and load-bearing capacity of several standard sizes of C-shaped profiles of different thicknesses

Number	<i>h</i> , mm	<i>b</i> , mm	<i>c</i> , mm	<i>t</i> , mm	Effective area A_{eff} , mm ²			Load capacity, N		
					CP	EN	AISI	CP	EN	AISI
1	300	80	20	1.2	235.20	229.47		62,563.09	65,855.88	54,370.66
2				2	551.46	548.44		146,688.26	154,408.70	128,233.41
3				3	856.24	954.38		254,715.81	268,121.90	226,116.31
4				4	1,370.79	1,392.38		364,629.07	383,820.07	328,300.90

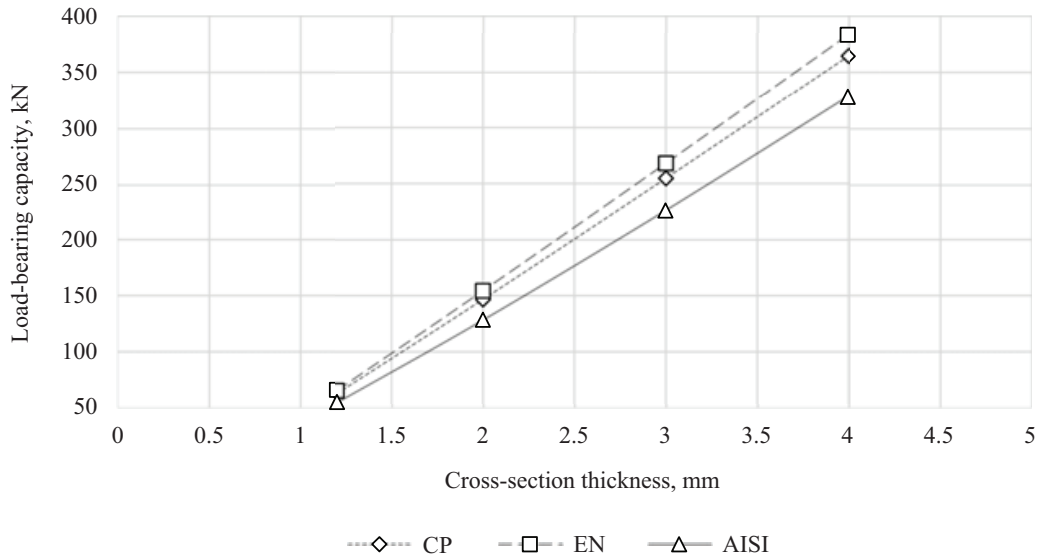


Fig. 6. Graph showing the dependence of the load-bearing capacity of a thin-walled rod on the thickness of the cross-section

The values of effective areas and load-bearing capacities for various section sizes are presented in Table 3–5. The dependence of the load-bearing capacity on the height of the thin-walled section can be traced in Fig. 4, on the width of the section — in Fig. 5, and on the thickness of the section — in Fig. 6.

1. The method for calculating strength characteristics according to CP 260.1325800.2016 and EN 1993-1-3: 2006 is identical. The difference in the load-bearing capacity values of identical profiles is 5 %. It is due to the coefficients: $\gamma_c = 0.95$ — according to CP and $\gamma_{M0} = 1$ — according to EN.

2. Another method, presented in AISI S100-16, gives the following discrepancies:

- 1) effective area values: 0.54–1.49 %;
- 2) bearing capacity values:
 - according to CP: 11.96–12.65 %; according to EN: 16.36–17.02 % — when changing the section height;
 - with CP: 11.15–11.28 %; with EN: 15.60–15.71 % — when changing the section width;
 - with CP: 9.96–13.09 %; with EN: 14.46–17.44 % — when changing the section thickness.

Such significant discrepancies are due to the use of the resistance factor j_c (resistance factor), which is used in the AISI S100–16 method.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The following conclusions were drawn from a study of Russian, European and North American regulatory documents governing the design rules and calculation methods for thin-walled bars.

CP 260.1325800.2016, partially harmonized with European regulatory documents (EN 1993-1-3: 2006), has significant differences from AISI S100–16: in terminology, style, layout, presentation and delivery of technical text, and in the choice of theoretical formulas and parameters.

The height of the cross-section of a thin-walled rod does not significantly affect its load-bearing capacity, since a significant part of it is cut out. When the width (height) of the wall is doubled (from 200 to 400 mm),

the load-bearing capacity of the profile according to CP and EN increases by 4.4 %, and according to AISI — by 5.1 %.

When the shelf width is increased by 1.7 times (from 60 to 100 mm), based on the range of technical conditions⁵, the load-bearing capacity of the profile according to CP and EN increases by 32.7 %, and according to AISI — by 37.2 %. The relationship between the load-bearing capacity of a thin-walled rod and the thickness of its cross-section is linear (see Fig. 5).

An increase in the thickness of the cross-section (for example, by 2 times) leads to an obvious sharp increase in the load-bearing capacity (according to CP and EN, it increases by 148.30 %, according to AISI — by 156.25 %). The relationship between the load-bearing capacity of a thin-walled rod and its cross-sectional thickness tends to be linear (see Fig. 6).

Calculations of thin-walled bars under compression according to CP 260.1325800.2016 and EN 1993-1-3 are similar to the calculations of elements of conventional steel structures presented in CP 16.13330.2017⁶ and EN 1993-1-1⁷. The only difference is the use of effective cross-sectional area (for thin-walled profiles) instead of net cross-sectional area. The method for calculating compressed thin-walled bars according to North American standards AISI S100-16 in the fourth stage (see Table 2) takes into account the calculated length and ultimate flexibility of the bar, which gives more reliable results. 's load-bearing capacity indicators for profiles according to AISI S100-16 are always lower than those according to CP 260.1325800.2016 and EN 1993-1-3, i.e. greater mechanical safety of the structure is assumed at the design stage. Thus, in order to update the domestic regulatory and technical framework, reference is made to the design and calculation experience of other countries.

⁶ CP 16.13330.2017. Steel structures. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2017; 140.

⁷ EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2005; 91.

REFERENCES

1. Kinzyabulatova D.F., Porivaev I.A., Nedoseko I.V. Buckling analysis of c-shaped cold-formed profiles. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 4(62):108–118. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_108. EDN JLMWXF. (rus.).
2. Egorov A.V., Egorov V.N. Computational and experimental study of longitudinal stability of the thin-walled flat bar structure. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2023; 3(135). DOI: 10.18698/2308-6033-2023-3-2256. EDN VFTQTU. (rus.).
3. Chernyavskiy I.D. Buckling of steel thin-walled cold-formed sigma-type sections rods. *Collection of competitive scientific works of students and graduate students: in 2 parts*. Brest, BrSTU, 2022; 1:310–314. (rus.).
4. Sovetnikov D.O., Azarov A.A., Ivanov S.S., Rybakov V.A. Methods of calculation of thin-walled bars: statics, dynamics and stability. *Alfabuild*. 2018; 2(4):7–33. DOI: 10.34910/ALF.4.1. (rus.).
5. Zhang P., Shahria Alam M. Compression tests of thin-walled cold-formed steel columns with Σ -shaped sections and patterned perforations distributed along

the length. *Thin-Walled Structures*. 2022; 174. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109082

6. Tushina O.A. The Features of Behaviour of a Thin-Walled Cold-Formed C-Purlin. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 10:64-74. EDN SWJDYN. (rus.).

7. Schafer B.W., Peköz T. The behavior and design of longitudinally stiffened thin-walled compression elements. *Thin-Walled Structures*. 1997; 27(1):65-78. DOI: 10.1016/0263-8231(96)00016-x

8. Kayumov R.A. Postbuckling behavior of compressed bars with nonlinearly elastic supports. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2022; 3:23-31. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.03. EDN OERASD. (rus.).

9. Rybakov V.A., Lalin V.V., Ivanov S.S., Azarov A.A. Coordinate functions quadratic approximation in V.I. Slivker's semi-shear stability theory. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 5(89):115-128. DOI: 10.18720/MCE.89.10. EDN VJZIUK.

10. Khodeeva V.A. Stability of a thin-walled plate within the limits of elasticity. *Young Don Researcher*. 2022; 5(38):61-65. EDN HIVJPU. (rus.).

11. Von Karman T., Sechler E.E., Donnell L. The strength of thin plates in compression. *Journal of Fluids Engineering*. 1932; 54(2):53-56. DOI: 10.1115/1.4021738

12. Winter G. Strength of thin steel compression flange. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1947; 112(1):527-554. DOI: 10.1061/TACEAT.0006092

13. Schafer B.W., Peköz T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Con-*

structional Steel Research. 1998; 47(3):193-210. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00007-8

14. Torabian S., Schafer B.W. Development and Experimental Validation of the Direct Strength Method for Cold-Formed Steel Beam-Columns. *Journal of Structural Engineering*. 2018; 144(10). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002117

15. Anbarasu M. Structural performance of cold-formed steel composite beams. *Steel and Composite Structures*. 2018; 27(5). DOI: 10.12989/scs.2018.27.5.545

16. Zenkov E.V. Functional aspects of the c stud from light steel thin-walled structures for stability. *International Research Journal*. 2021; 3-1(105):54-59. DOI: 10.23670/IRJ.2021.105.3.009. EDN QKEEVM. (rus.).

17. Nadolski V., Dzerhachou M. Effective width method for thin-walled cold-formed elements in accordance with Eurocode 3. Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. *Applied Sciences*. 2017; 8:105-111. EDN ZVZCYH. (rus.).

18. Zhang P., Shahria Alam M. Experimental investigation and numerical simulation of pallet-rack stub columns under compression load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 133:282-299. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.02.023

19. Jovanovic D., Zarkovic D., Dobric J. Design and application of cold-formed thin-walled members. *Planning, design, construction and building renewal: scientific conference*. 2018; 125-134.

20. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspart J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel. *Steel Construction*. 2022; 15(1):43-47. DOI: 10.1002/stco.202100051

Received November 20, 2024.

Adopted in revised form on December 27, 2024.

Approved for publication on January 20, 2025.

BIONOTES: Regina A. Gatiatullina — graduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; gatiatullina.regina@mail.ru;

Alexander M. Ibragimov — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID: 0000-0003-3761-9213; IbragimovAM@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Regina A. Gatiatullina — execution and analysis of calculations, writing the source text, final conclusions.

Alexander M. Ibragimov — scientific supervision, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.3

Продолжительность консолидации грунта ядра каменно-земляной плотины

Михаил Петрович Саинов¹, Александр Анатольевич Болдин²¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия;² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В глинистом грунте противофильтрационного ядра высокой каменно-земляной плотины всегда возникает избыточное поровое давление воды. Оно может достигать высоких значений и представлять угрозу для безопасности плотины. Современное поровое давление уменьшается, но консолидация грунта может быть длительной, продолжительность процесса консолидации можно определить аналитическими и численными методами. Предыдущие исследования авторов показали, что только численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) и нестационарного фильтрационного режима сооружения может адекватно воспроизвести процесс формирования и рассеивания порового давления. В этой связи интерес представляет применение численного моделирования также и для оценки длительности процесса консолидации грунта в ядре каменно-земляной плотины.

Материалы и методы. Исследование продолжительности рассеивания избыточного порового давления выполнено путем численного моделирования НДС и фильтрационного режима на примере сверхвысокой каменно-земляной плотины с центральным ядром. Расчет проводился для нескольких вариантов коэффициента фильтрации глинистого грунта ядра.

Результаты. Результаты численного моделирования показали, что поровое давление в ядре оказывает существенное влияние на НДС всей плотины, на ее перемещения и напряжения. Установлено, что при коэффициенте фильтрации более $1 \cdot 10^{-7}$ см/с консолидация грунта завершается еще в период строительства, а при коэффициенте фильтрации менее $1 \cdot 10^{-8}$ см/с консолидация продолжается десятки лет. По сравнению с простым аналитическим методом теории фильтрационной консолидации длительность процесса консолидации оказалась примерно в 2 раза короче. Это связано с тем, что численное моделирование учитывает, что движение фильтрационного потока осуществляется не только в дренаж, но и в зоны с меньшим поровым давлением.

Выводы. По результатам численного моделирования консолидация грунта ядра завершается примерно в 2 раза быстрее, чем по результатам расчета простым аналитическим методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каменно-земляная плотина с ядром, поровое давление воды, консолидация грунта, напряженно-деформированное состояние, моделирование методом конечных элементов, фильтрация, коэффициент фильтрации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саинов М.П., Болдин А.А. Продолжительность консолидации грунта ядра каменно-земляной плотины // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 3. URL: <http://ns-o-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.3

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

Duration of core soil consolidation of earth core rockfill dam

Mikhail P. Sainov¹, Aleksandr A. Boldin²¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Surplus water pore pressure always appears in a clayey soil of the seepage control core of a high earth core rockfill dam. It may reach high values and present threat the dam safety. With time the pore pressure decreases but the soil consolidation may be durable; duration of consolidation process can be determined by the analytical and numerical methods. Our previous studies showed that only numerical modeling of the structure stress-strain state (SSS) and unsteady regime may adequately simulate the process of pore pressure formation and dissipation. Therefore, of interest is the use of numerical modeling also for estimation of soil consolidation process duration in the core of a rockfill dam.

Materials and methods. Study of duration of surplus core pressure dissipation was conducted with the aid of numerical modeling of SSS and seepage regime on the example of an ultra-high rockfill dam with a central core. Analysis was carried out for several options of core clayey soil permeability.

Results. The results of numerical modeling showed that pore pressure in the core considerably affects the SSS of the whole dam, its displacements and stresses. It was established that at permeability exceeding $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s the soil consolidation completes even during construction period, and at permeability less than $1 \cdot 10^{-8}$ cm/s the consolidation continues for dozens of years. As compared to a simple analytical method of the seepage consolidation theory the duration of consolidation process turned to be approximately two times as less. This is related to the fact that numerical modeling takes into account that movement of the seepage flow is realized not only into a drainage facility but also penetrates in the zones with less pore pressure.

Conclusions. By the results of numerical modeling the core soil consolidation is completed two times as fast as compared with the analysis results obtained by a simple analytical method.

KEYWORDS: earth core rockfill dam, pore water pressure, soil consolidation, stress-strain state, FEM analysis, seepage, filtration coefficient

FOR CITATION: Sainov M.P., Boldin A.A. Duration of core soil consolidation of earth core rockfill dam. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.3

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

ВВЕДЕНИЕ

Избыточное поровое давление в грунте ядра каменно-земляной плотины возникает вследствие его уплотнения при восприятии внешних нагрузок (прежде всего от собственного веса). С течением времени поровое давление «рассеивается», т.е. уменьшается до уровня, соответствующего давлению фильтрационных вод, этот процесс называют *консолидацией* грунта. Наличие избыточного порового давления создает угрозу для безопасности плотины, поскольку снижает сдвиговую прочность грунта, провоцирует гидравлический разрыв ядра. Этот эффект демонстрируют расчетные исследования [1, 2], которые посвящены образованию напряженно-деформированного состояния (НДС) каменно-земляных плотин. При проектировании каменно-земляных плотин важно спрогнозировать продолжительность процесса консолидации грунта ядра, в течение которого плотина может иметь пониженный уровень безопасности.

Процессы формирования и рассеивания порового давления в ядре каменно-земляных плотин стали изучать с середины XX в., так как именно в этот период плотины данного типа начали активно применять для строительства высоконапорных гидроузлов. Такие исследования осуществлялись с помощью натурных измерений и теоретических расчетов.

В работе [3] опубликованы сведения натурных измерений порового давления в нескольких плотинах, построенных в XX в. Описаны результаты натурных наблюдений за сверхвысокой плотинной Ну-рексской ГЭС [4]. В публикациях [1, 5, 6] приведены результаты мониторинга порового давления в современных высоких каменно-земляных плотинах. Статья [1] посвящена изучению порового давления в плотине Masjed-e-Soleyman (высота $H = 177$ м, Иран, 2002 г.), [5] — в плотине Nuozhadu ($H = 261,5$ м, Китай, 2012 г.), [6] — в плотине Bidvaz ($H = 66$ м, Иран).

Анализ результатов натурных измерений [3] показывает, что процесс консолидации грунта ядра

в разных плотинах происходил с разной скоростью. Во многих плотинах (Aswan, Pachkamar, Charvak, Euvashan) консолидация грунта протекала быстро и поровое давление к началу периода эксплуатации было сопоставимо с гидростатическим давлением [3, 7]. Напротив, в ядре плотины Talbingo ($H = 162$ м, Австрия, 1971 г.) поровое давление достигало значительных величин и рассеивалось медленно [3]. Это связывают с тем, что ядро этой плотины выполнено из глины.

Прогноз продолжительности консолидации особенно актуален для строительства новых каменно-земляных плотин. Статистика свидетельствует, что в XXI в. построено несколько новых сверхвысоких и высоких каменно-земляных плотин. Сверхвысокими являются плотины San Roque ($H = 210$ м, Филиппины, 2003 г.), Tehri ($H = 260,5$ м, Индия, 2006 г.), Nuozhadu ($H = 261,5$ м, Китай, 2012 г.) [8, 9, 5], Changheba ($H = 240$ м, Китай, 2017 г.), их высота превышает 200 м. К высоким относятся плотины Karkheh ($H = 127$ м, Иран, 2001 г.) [10–12], Masjed-e-Soleyman ($H = 177$ м, Иран, 2002 г.) [1, 13], Qiaoqi ($H = 125,5$ м, Китай, 2006 г.) [14], Pubugou ($H = 186$ м, Китай, 2010 г.) [15], Maoergai ($H = 147$ м, Китай, 2011 г.) [14], Upper Gotvand ($H = 180$ м, Иран, 2012 г.), Madani ($H = 91$ м, Иран, 2014 г.) [16]. Результаты натурных измерений порового давления в некоторых из указанных плотин опубликованы в трудах [1, 5].

Изучение порового давления осуществляется также и расчетными методами, основанными на теории консолидации. Основоположителем теории консолидации является К. Терцаги, он первым предложил уравнения, описывающие этот процесс. В СССР А.А. Ничипоровичем и Т.И. Цыбульник [17] был разработан аналитический метод расчета консолидации грунта в ядре каменно-земляной плотины.

В настоящее время задачи консолидации решаются с помощью численного моделирования. Например, публикации [1, 5, 7, 18–21] посвящены численным исследованиям НДС и порового давления в ядрах каменно-земляных плотин. В большинстве случаев расчетные исследования показывают,

что консолидация грунта ядра завершается довольно быстро.

Точность расчетных прогнозов зависит от качества исходных данных расчета. В работе [5] рассматривается поровое давление в ядре плотины Nuozhadu, было показано, что адекватные результаты расчета обеспечиваются при значении коэффициента фильтрации $(1,5 - 5) \cdot 10^{-9}$ см/с, которое гораздо меньше измеренного в натуре. Выдвинуто предположение, что снижение проницаемости грунта связано с его уплотнением под действием нагрузок [5]. Аналогичный эффект описан также в исследовании [4] применительно к ядру Нурекской плотины.

Но этот эффект лишь одно из проявлений взаимосвязи процессов консолидации грунта и формирования НДС сооружения. По результатам исследований сделан вывод о том, что из-за взаимосвязи с напряженным и деформированным состоянием грунта процессы его консолидации носят сложный характер во времени и пространстве [5]. Этот вывод подтверждается также результатами исследований авторов [22, 23]. Было показано, что характер деформирования сооружения под нагрузкой имеет определяющее значение для величины порового давления в ядре, расчеты продемонстрировали, что благодаря деформациям расширения большая часть избыточного порового давления успевает рассеяться еще до наполнения водохранилища. Только численное моделирование дает возможность учесть влияние характера деформирования сооружения на формирование порового давления.

Однако в предыдущих работах авторов настоящего исследования рассматривался только этап строительства плотины, когда под действием внешних нагрузок происходит формирование порового давления в ядре, а этап эксплуатации, на котором осуществляется рассеивание порового давления, не рассматривался.

В этой связи интересно с помощью численного моделирования изучить и процесс консолидации грунта, а также сравнить прогноз продолжительности консолидации по результатам расчета аналитическим и численным методами.

В аналитическом методе, основанном на теории фильтрационной консолидации, учитывается, что рассеивание порового давления происходит

только за счет оттока жидкости (фильтрации). Из решения задачи о консолидации слоя маловодопроницаемого грунта, полученного К. Терцаги, можно получить формулу для выявления продолжительности консолидации. Это время, которое необходимо для снижения порового давления от максимального p_1 до давления фильтрационных вод p_2 . Для точки, расположенной на максимальном удалении от дренажа (посередине слоя), получается следующая приближенная формула для определения продолжительности Δt консолидации:

$$\Delta t = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot g}{K \cdot k_{\phi}} \cdot h^2 \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность воды; K — модуль объемных деформаций грунта; k_{ϕ} — коэффициент фильтрации; h — длина пути фильтрации (полутолщина слоя); p_1, p_2 — поровое давление соответственно в начале и конце интервала времени.

Эта приближенная формула выражает влияние основных факторов на длительность консолидации и удобна для понимания. Как видно из формулы, более длительная консолидация характерна для высоких каменно-земляных плотин, в которых ширина ядра $2h$ большая, а начальное поровое давление может достигать больших значений. Из формулы очевидно, что в разных зонах ядра продолжительность фильтрации будет различаться, в верхней части она будет завершаться быстрее, чем в нижней. Однако определяющее значение на срок консолидации имеет водопроницаемость грунта — он обратно пропорционален коэффициенту фильтрации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка продолжительности консолидации грунта ядра выполнена также путем численного моделирования. Процессы формирования и рассеивания порового давления моделировались совместно с процессами формирования НДС и фильтрационного режима плотины.

Расчет был проведен на примере сверхвысокой каменно-земляной плотины с центральным ядром средней ширины. Этим характеристикам отвечает конструкция плотины Нурекской ГЭС. Высота плотины составляет 300 м. Максимальный напор, ко-

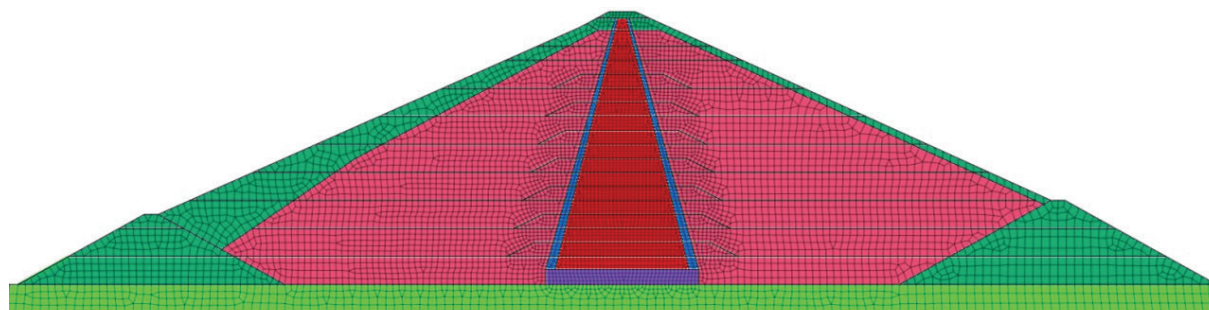


Рис. 1. Конечно-элементная модель расчетного сечения плотины

Табл. 1. Расчетные физико-механические характеристики грунтов

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ_d , т/м ³	Плотность в водонасыщенном состоянии ρ_{sat} , т/м ³	Модуль линейной деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Супесь	2,10	2,28	40	0,32
Грунты переходных зон	2,10	2,20	55	0,3
Гравийно-галечниковый грунт упорных призм	2,16	2,35	150	0,27
Горная масса	1,96	2,22	150	0,27

торый воспринимает ядро, — 263,5 м, ширина ядра понизу — 143,5 м.

Расчет производился методом конечных элементов с помощью вычислительного программного комплекса MIDAS.

Использованная для расчетов конечно-элементная модель сечения плотины насчитывает 6975 узлов и 6906 конечных элементов (рис. 1).

Расчеты выполнялись с учетом последовательности возведения плотины и наполнения водохранилища. Принималось, что сооружение возводится в течение 9 лет, а наполнение водохранилища осуществляется параллельно с отсыпкой грунта.

При расчете рассматривались нагрузки от собственного веса грунта, а действие водной среды

учитывалось только в форме порового давления и создаваемых им фильтрационных сил.

При моделировании поведения грунтов использовалась модель Кулона – Мора, предусматривающая линейное деформирование грунта. Физико-механические свойства грунтов, принятые в расчете, приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты выполнялись для нескольких вариантов проницаемости грунта ядра. Коэффициент фильтрации принимался равным: в варианте № 1 — 1×10^{-6} см/с, в варианте № 2 — $1 \cdot 10^{-7}$ см/с, в варианте № 3 — $1 \cdot 10^{-8}$ см/с, в варианте № 4 — $5 \cdot 10^{-9}$ см/с.

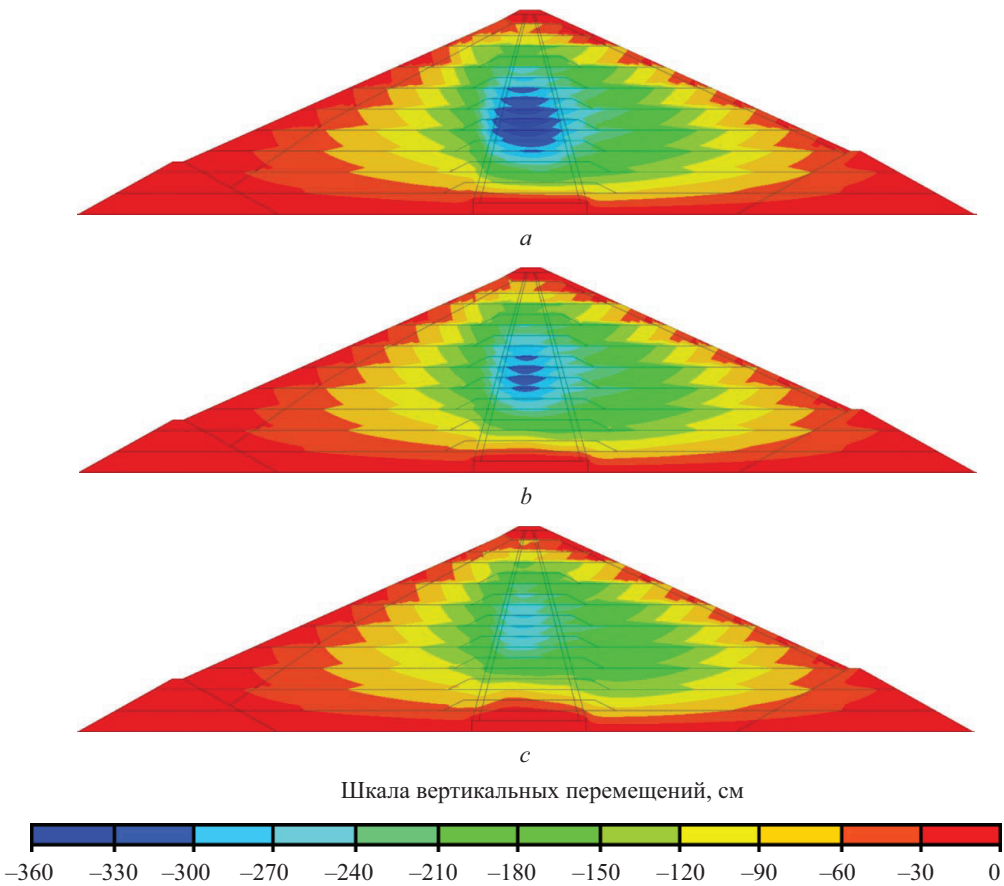


Рис. 2. Осадки плотины на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: а — вариант № 1; б — вариант № 2; с — вариант № 3

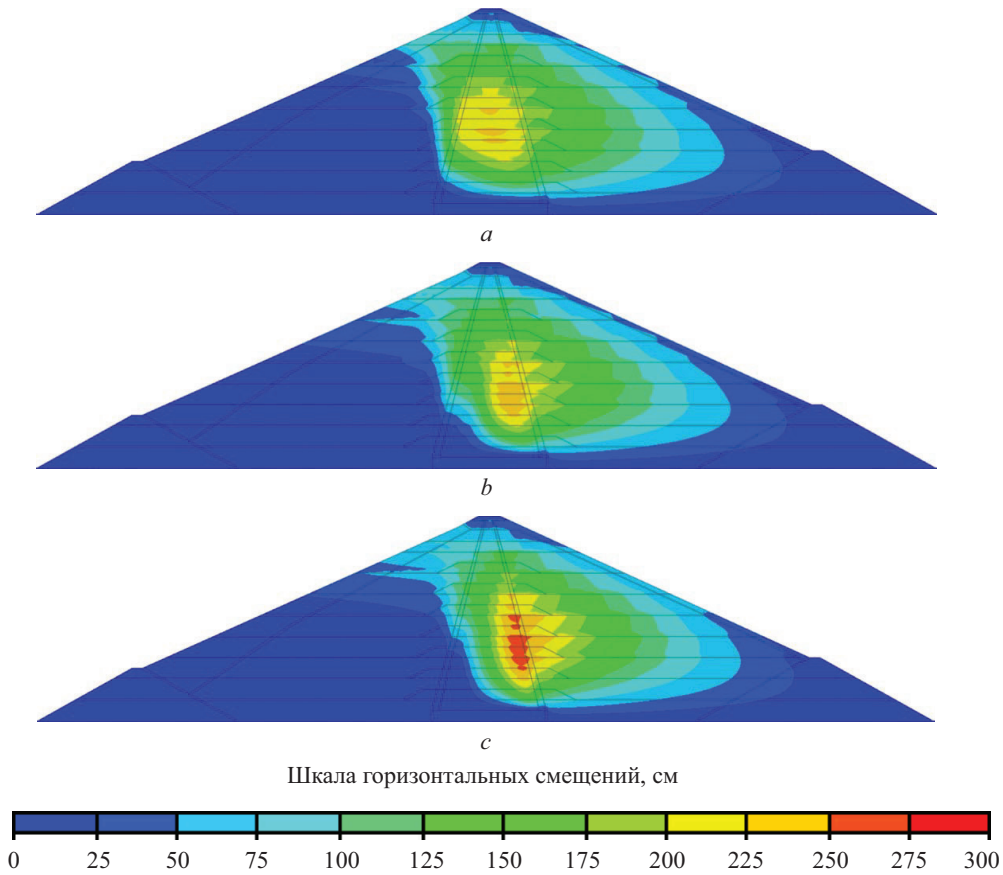


Рис. 3. Горизонтальные смещения плотины на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2; *c* — вариант № 3

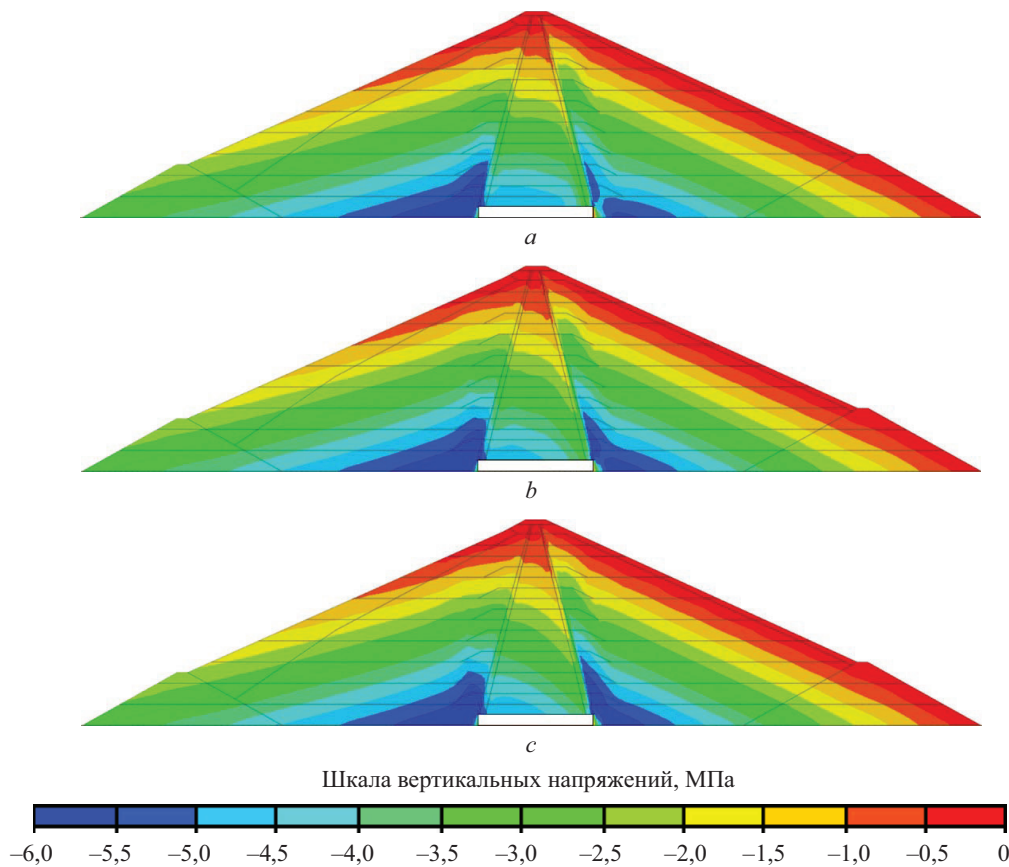


Рис. 4. Вертикальные totalные напряжения в плотине на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2; *c* — вариант № 3

Напряженно-деформированное состояние на момент окончания строительства

Для каждого из вариантов были определены и проанализированы перемещения, напряжения, поровое давление в плотине. Они показаны на рис. 2–8. Перемещения приведены с учетом последовательности возведения и нагружения сооружения, они представляют собой сумму перемещений, полученных сооружением на каждом из этапов возведения/нагружения. Напряжения анализировались как эффективные (только для твердого скелета грунта), так и тотальные (суммарные по твердой и жидкой фазам грунта).

НДС плотины во всех вариантах схож и на момент завершения строительства имеет следующие общие характерные признаки:

- строительные осадки U_y плотины достигают максимума в центральной части ядра и составляют около 1 % от ее высоты (рис. 2);
- горизонтальные смещения U_x плотины направлены в сторону нижнего бьефа и достигают максимума в ядре, в то время как большой объем верховой упорной призмы имеет смещения, близкие к 0 (рис. 3);
- в распределении тотальных вертикальных напряжений σ_y проявляется арочный эффект (т.е. эффект «зависания» ядра на упорных призмах) — в ядре наблюдается дефицит сжимающих напряжений,

в то время как в упорных призмах возникают зоны концентрации сжимающих напряжений (рис. 4);

- для распределения тотальных горизонтальных напряжений σ_x характерен меньший уровень сжатия в низовой упорной призме по сравнению с ядром (рис. 5). На границе между ядром и верховой упорной призмой отсутствует скачок в величинах горизонтальных напряжений, так как ядро считается проницаемым и давление верхнего бьефа действует в форме распределенных по объему фильтрационных сил, а не в форме гидростатического давления на грань ядра;

- эффективные напряжения в ядре (рис. 6, 7) существенно меньше тотальных (рис. 4, 5) из-за высоких величин порового давления в ядре (рис. 8).

Однако НДС плотины в рассмотренных вариантах имеет и существенные различия. Они вызваны различиями в условиях формирования и величинах порового давления в ядре.

В варианте № 1, в котором грунт ядра обладает высокой проницаемостью ($k_\phi = 1 \cdot 10^{-6}$ см/с), консолидация грунта завершается уже к началу периода эксплуатации. На рис. 8, а видно, что на момент начала периода эксплуатации в ядре не наблюдается избыточного порового давления — поровое давление соответствует установившемуся фильтрационному режиму. Максимальное поровое давление 2,6 МПа отмечается в левом нижнем углу (рис. 8, а)

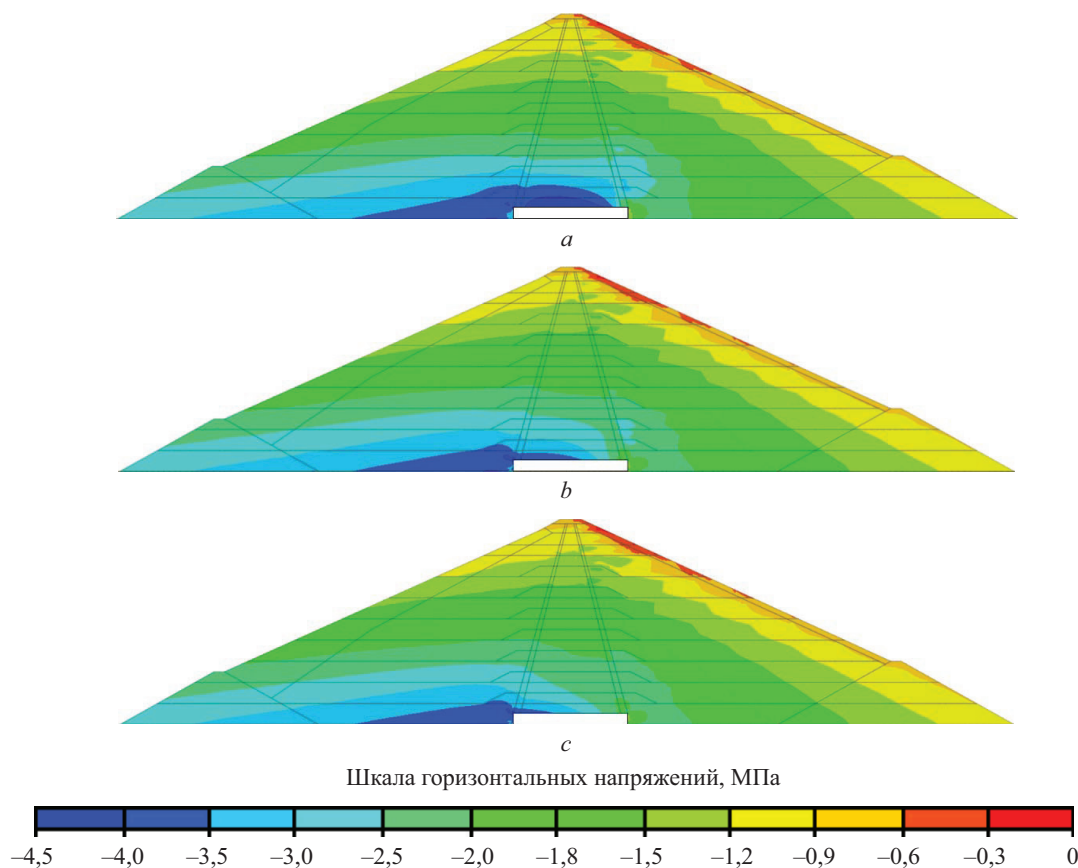


Рис. 5. Горизонтальные тотальные напряжения в плотине на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: а — вариант № 1; б — вариант № 2; с — вариант № 3

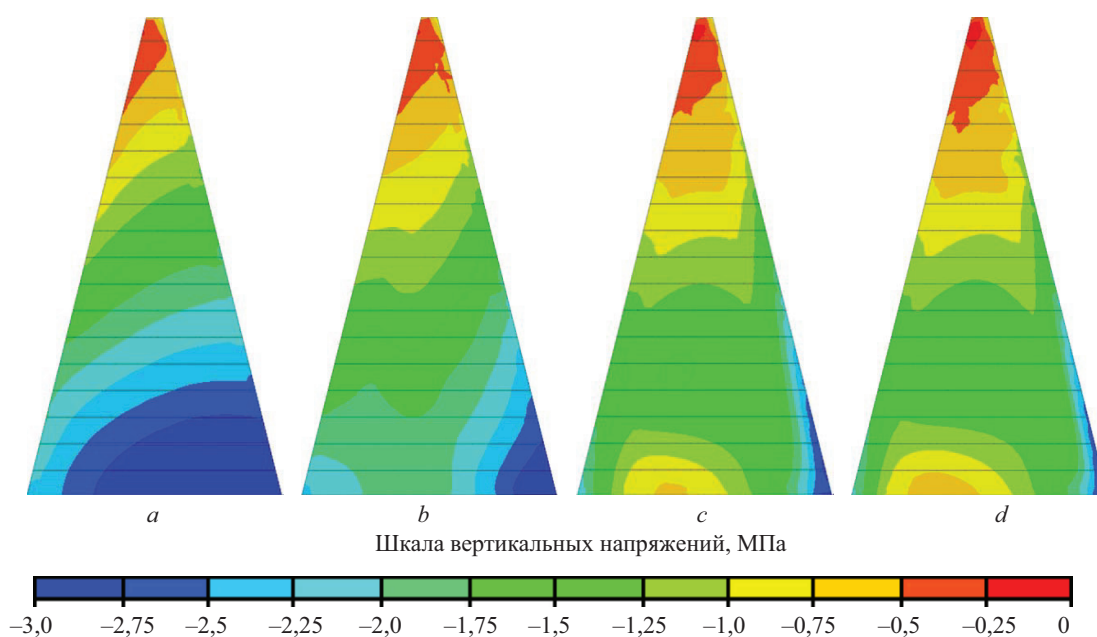


Рис. 6. Вертикальные эффективные напряжения в ядре плотины на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2; *c* — вариант № 3; *d* — вариант № 4

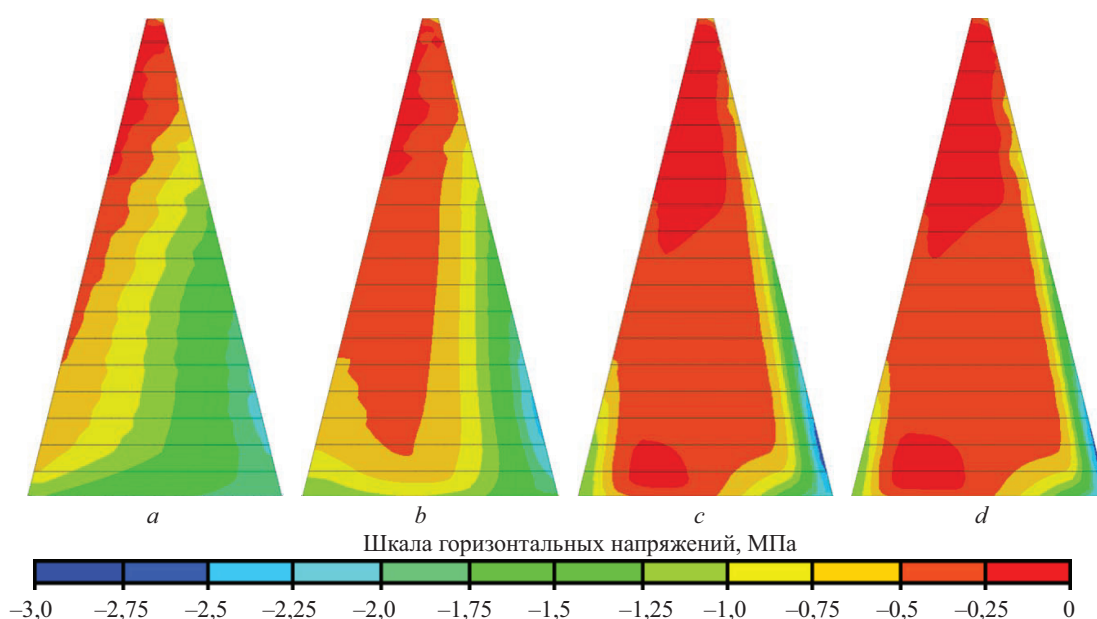


Рис. 7. Горизонтальные эффективные напряжения в ядре плотины на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2; *c* — вариант № 3; *d* — вариант № 4

и оно уменьшается в направлении снизу вверх и от верховой грани к низовой.

Благодаря низкому поровому давлению ядро находится в благоприятном напряженном состоянии. Эффективные напряжения (напряжения в скелете) в ядре везде сжимающие, причем в большей части ядра они довольно велики и превышают 0,5 МПа. Эффективные напряжения σ_y в вертикальном направлении много больше, чем в горизонтальном. Вертикальные напряжения σ_y достигают 3 МПа (рис. 7, *a*), а горизонтальные — не превышают 2 МПа (рис. 8, *a*).

Тотальные напряжения σ_y в ядре не превышают 5,0 МПа (рис. 4, *a*).

По расчету максимальная строительная осадка ядра в варианте № 1 составила 360 см (рис. 2, *a*), а максимальное смещение — 234 см (рис. 3, *a*). Зона максимальных по величине смещений располагается в центре ядра.

Для других вариантов № 2–4 с меньшей проницаемостью грунта ядра характерно возникновение в ядре избыточного порового давления. Оно вносит значительные коррективы в НДС ядра и всей пло-

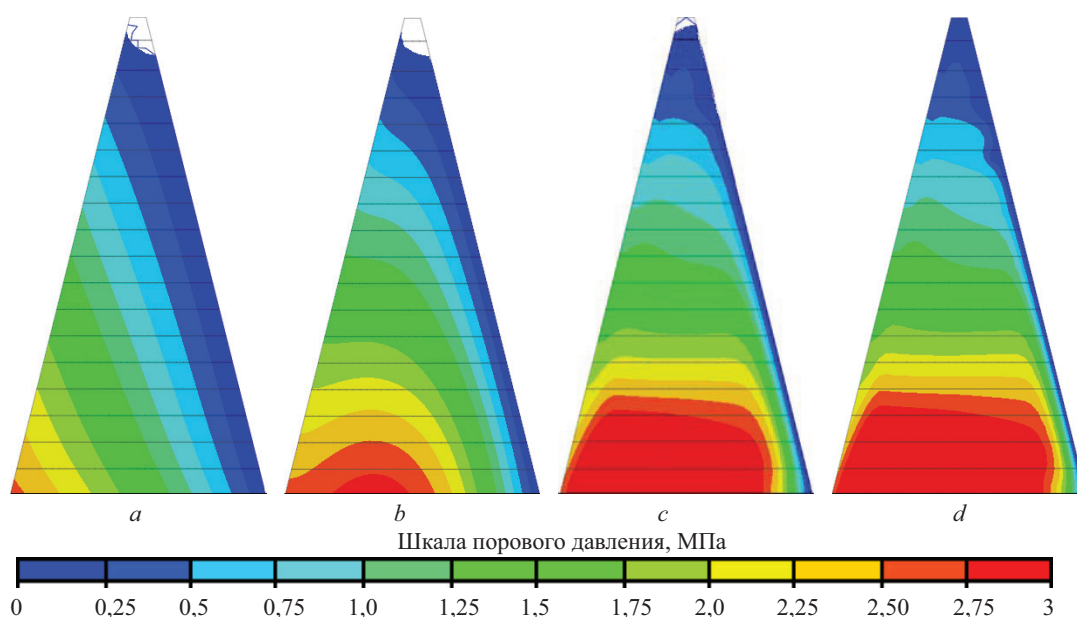


Рис. 8. Поровое давление в ядре плотины на момент окончания строительства для различных вариантов проницаемости грунтов: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2; *c* — вариант № 3; *d* — вариант № 4

тины. Влияние избыточного порового давления выражается в следующем:

- чем меньше коэффициент фильтрации грунта ядра, тем выше поровое давление и меньше сжимающие эффективные напряжения в ядре;
- чем меньше коэффициент фильтрации грунта ядра, тем меньше смещения и осадки плотины на момент окончания строительства.

В варианте № 2 ($k_{\phi} = 1 \cdot 10^{-7}$ см/с) избыточное поровое давление в ядре невелико по сравнению с фильтрационным. На момент окончания строительства максимальное значение порового давления составило 2,87 МПа (рис. 9, *b*), т.е. на 10 % выше, чем в варианте № 1. Распределение эффективных напряжений в варианте № 2 близко к тому, которое характерно для варианта № 1. Однако на рис. 6, *b*; 7, *b* заметно существенное снижение сжимающих напряжений σ_x и σ_y в ядре.

Деформации плотины в варианте № 2 отличаются от деформаций в варианте № 1. Строительные осадки U_y плотины несколько меньше, чем в варианте № 1. Максимальная осадка плотины в варианте № 2 составляет 3,28 м (рис. 2, *b*), что на 9 % меньше, чем в варианте № 1. Напротив, горизонтальные смещения U_x плотины в варианте № 2 больше, чем в варианте № 1 (рис. 3, *b*). Максимальное смещение в варианте № 2 составило 2,48 м, т.е. на 6 % выше, чем в варианте № 1. Зона максимальных по величине смещений располагается в нижней части ядра.

В вариантах с малой проницаемостью грунта ядра (вариант № 3, $k_{\phi} = 1 \cdot 10^{-8}$ см/с и № 4 $k_{\phi} = 5 \times 10^{-9}$ см/с) НДС плотины очень сильно отличается от НДС плотины в варианте № 1.

В этих вариантах избыточное поровое давление много больше, чем фильтрационное. Особенно вы-

соким поровое давление является в нижней части ядра. В варианте № 3 поровое давление достигает 4,2 МПа (рис. 9, *c*), а в варианте № 4 — 4,3 МПа (рис. 9, *d*). Практически вся вертикальная нагрузка воспринимается поровым давлением.

Из-за медленной консолидации грунт ядра обладает меньшей сжимаемостью и большей деформируемостью при изменении формы (при сдвиге). Из-за меньшей сжимаемости осадки плотины существенно меньше, чем в варианте № 1. Максимальная осадка в варианте № 3 составила 2,79 м (рис. 2, *c*), а в варианте № 4 — 2,72 м. Она примерно на 22 % меньше осадки в варианте № 1. Вследствие большей склонности к деформациям формоизменения плотина приобретает большие смещения. Максимальное смещение в варианте № 3 составило 2,76 м (рис. 3, *c*), а в варианте № 4 — 2,83 м. Оно примерно на 20 % больше, чем в варианте № 1.

Изменение характера деформаций влечет за собой и изменение в распределении напряжений. Для варианта № 3 характерен пониженный уровень сжатия в ядре по totalным и эффективным напряжениям. По totalным напряжениям это снижение заметно мало (рис. 4, *c*; 5, *c*), а по эффективным напряжениям — очень велико.

Для вариантов № 3 и 4 характерно наличие в ядре большой зоны относительно низких (менее 0,5 МПа) сжимающих напряжений σ_x (рис. 6, *c*, *d*). В верхней и нижней части ядра имеются зоны со сжимающими напряжениями менее 0,25 МПа. По вертикальным напряжениям σ_y в нижней части ядра также существует зона пониженных сжимающих напряжений (рис. 7, *c*, *d*). Такое напряженное состояние ядра является неблагоприятным и несет в себе опасность образования нарушений сплошности в ядре.

Консолидация грунта ядра и изменения напряженно-деформированного состояния плотины во времени

С целью установления продолжительности процесса консолидации грунта был выполнен расчет изменения НДС плотины для интервала времени 100 лет. Результаты этого расчета для вариантов № 1–4 представлены на рис. 9–12. На рис. 9 для ряда моментов времени показано распределение порового давления в ядре, на рис. 10, 11 — распределение эффективных напряжений. На рис. 12 приведен график изменения максимального значения порового давления во времени.

В варианте № 1 никаких изменений НДС в эксплуатационный период не происходит, так как консолидация грунта завершилась еще в период строительства.

Из рис. 9–12 хорошо видно, что с течением времени происходят постепенное рассеивание порового давления (рис. 9) и рост сжимающих эффективных напряжений (рис. 10, 11). Однако этот процесс имеет разную продолжительность в зависимости от проницаемости грунта ядра. В варианте № 2 он занимает несколько лет и затем поровое давление становится соответствующим фильтрационному (рис. 9, *b*). В вариантах № 3 и 4 даже через 30 лет эксплуатации поровое давление изменяется мало (рис. 10, *b*, *e*), а в нижней части ядра оно остается высоким даже через 100 лет (рис. 10, *c*, *f*). Соответственно, в этих вариантах длительное время сохраняется опасность развития нарушений сплошности ядра.

Изменение НДС ядра сопровождается дополнительными перемещениями плотины. Осадки пло-

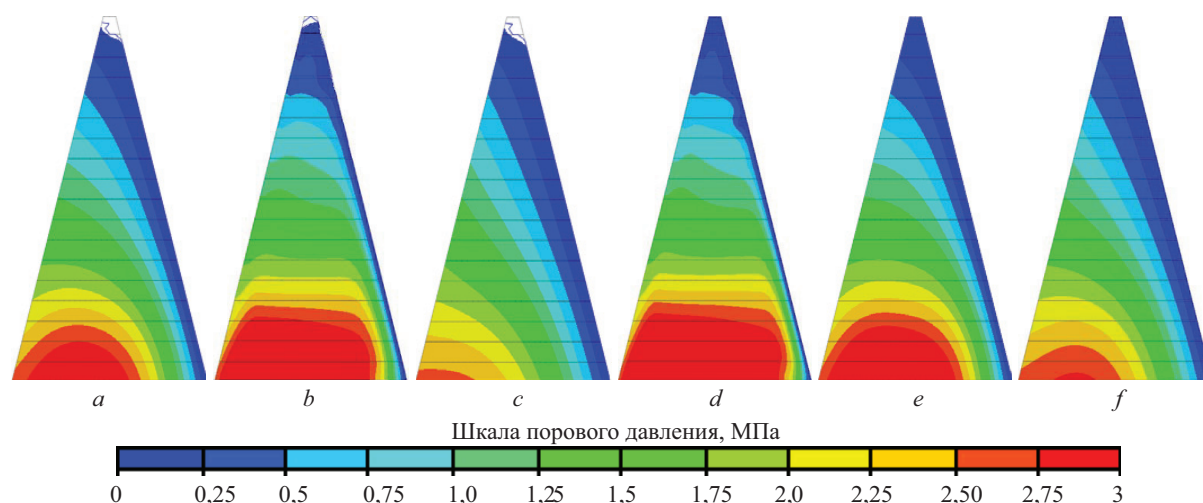


Рис. 9. Изменение во времени порового давления в ядре для двух вариантов проницаемости грунта: *a*, *b*, *c* — вариант № 3 (при коэффициенте фильтрации $1 \cdot 10^{-8}$ см/с); *d*, *e*, *f* — вариант № 4 (при коэффициенте фильтрации $5 \cdot 10^{-9}$ см/с); *a*, *d* — в начале периода эксплуатации ($t = 0$); *b*, *e* — через 30 лет эксплуатации; *c*, *f* — через 100 лет эксплуатации

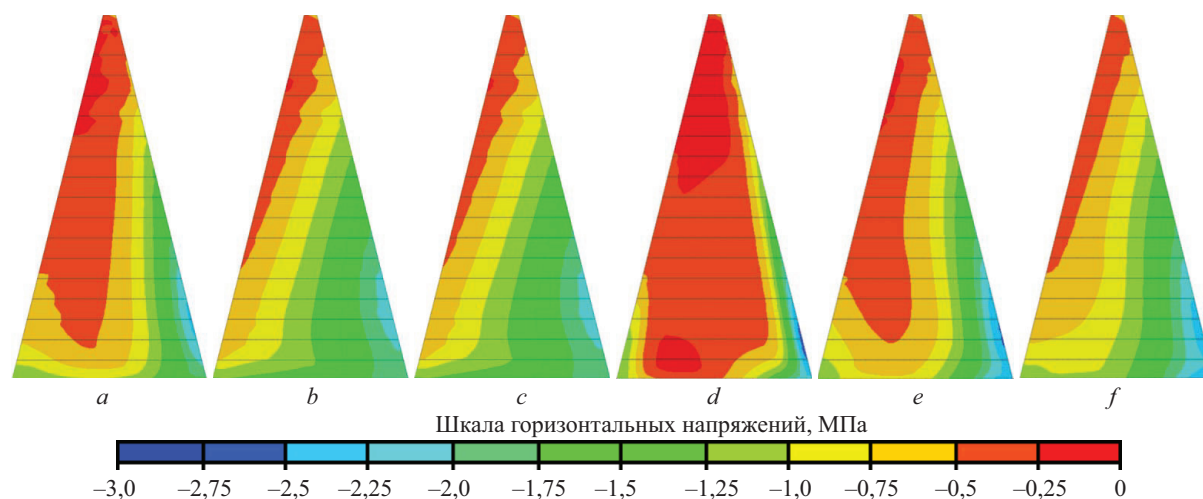


Рис. 10. Изменение во времени горизонтальных эффективных напряжений в ядре для двух вариантов проницаемости грунта: *a*, *b*, *c* — вариант № 3 (при коэффициенте фильтрации $1 \cdot 10^{-8}$ см/с); *d*, *e*, *f* — вариант № 4 (при коэффициенте фильтрации $5 \cdot 10^{-9}$ см/с); *a*, *d* — в начале периода эксплуатации ($t = 0$); *b*, *e* — через 30 лет эксплуатации; *c*, *f* — через 100 лет эксплуатации

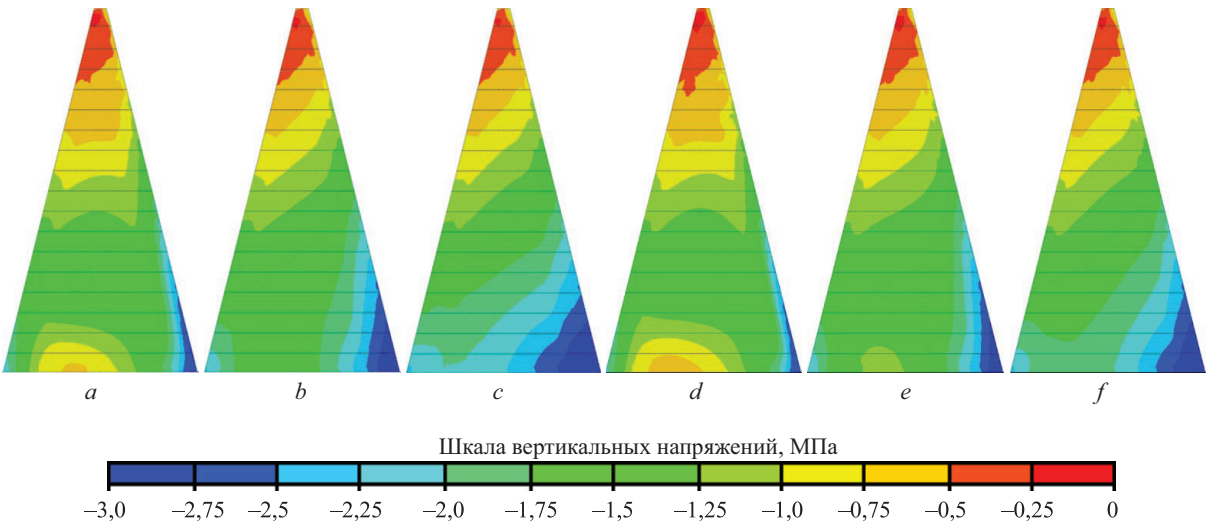


Рис. 11. Изменение во времени вертикальных эффективных напряжений в ядре для двух вариантов проницаемости грунта: *a, b, c* — вариант № 3 (при коэффициенте фильтрации $1 \cdot 10^{-8}$ см/с); *d, e, f* — вариант № 4 (при коэффициенте фильтрации $5 \cdot 10^{-9}$ см/с); *a, d* — в начале периода эксплуатации ($t = 0$); *b, e* — через 30 лет эксплуатации; *c, f* — через 100 лет эксплуатации

Табл. 2. Изменение с течением времени максимальных перемещений плотины

Номер варианта	Коэффициент фильтрации, см/с	Максимальная осадка, м		Максимальное смещение, м	
		0 лет	100 лет	0 лет	100 лет
1	$1 \cdot 10^{-6}$	3,6	3,61	2,34	2,37
2	$1 \cdot 10^{-7}$	3,28	3,69	2,48	2,49
3	$1 \cdot 10^{-8}$	2,79	3,44	2,76	2,60
4	$5 \cdot 10^{-9}$	2,72	3,23	2,83	2,66

тины увеличиваются, они стремятся к тем величинам, которые характерны для варианта № 1 (табл. 2). Осадка плотины в варианте № 2 через 100 лет примерно соответствует осадке плотины в варианте № 1. В вариантах № 3 и 4 максимальные осадки увеличиваются примерно на 20 % по сравнению с первоначальными, но не успевают достигнуть значений, характерных для варианта № 1.

Горизонтальные смещения в варианте № 2 за 100 лет практически не изменяются (табл. 2).

В вариантах № 3 и 4, напротив, в течение эксплуатационного периода происходит небольшое уменьшение (примерно на 5 %) максимальных значений горизонтальных смещений.

Из рис. 12 становится ясной продолжительность процесса консолидации по результатам численного моделирования. В варианте № 2 консолидация завершается примерно в течение 5 лет, в варианте № 3 она длится около 80 лет, а в варианте № 4 не завершается и через 100 лет.

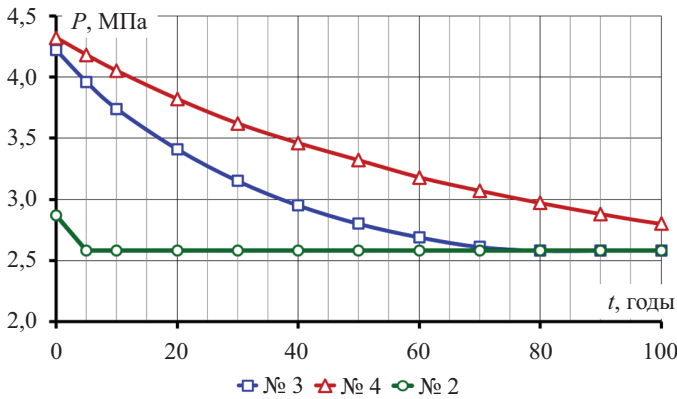


Рис. 12. Изменение во времени максимальной величины порового давления для разных вариантов проницаемости грунта ядра

Табл. 3. Результаты расчета длительности консолидации аналитическим методом

Номер варианта	Коэффициент фильтрации, см/с	Длительность консолидации при начальном давлении	
		2,5 МПа	4,5 МПа
1	$1 \cdot 10^{-6}$	1,0	1,9
2	$1 \cdot 10^{-7}$	9,7	19,5
3	$1 \cdot 10^{-8}$	96,7	195
4	$5 \cdot 10^{-9}$	193	390

Табл. 4. Сравнение расчета длительности консолидации по аналитическому и численному методам

Номер варианта	Коэффициент фильтрации, см/с	Расчет длительности консолидации аналитическим методом			Длительность консолидации по результатам численного моделирования, годы
		p_2 , МПа	p_1 , МПа	t , годы	
1	$1 \cdot 10^{-6}$	2,6	2,6	374	150
2	$1 \cdot 10^{-7}$	2,87	1,4	183	80
3	$1 \cdot 10^{-8}$	4,2	1,4	12	3
4	$5 \cdot 10^{-9}$	4,3	1,4	0,0	0

В этой связи интересно сравнить результаты численного моделирования с результатами расчета аналитическим методом.

Расчет продолжительности процесса консолидации аналитическим методом

Расчет простым аналитическим методом заключался в использовании формулы (1), полученной по теории К. Терцаги. Он выполнялся для нижнего сечения ядра, для которого полуширина составляет примерно $h = 70$ м. Модуль объемной деформации грунта принимался равным $K = 37$ МПа, что соответствует заданным значениям модуля линейной деформации и коэффициента Пуассона.

В табл. 3 приведена полученная расчетом длительность рассеивания порового давления для нескольких вариантов сочетания водопроницаемости грунта ядра и начального порового давления p_1 . В качестве конечного значения порового давления, до которого оно снижается, принималось $p_2 = 1,4$ МПа. Это максимальное значение фильтрационного давления, которое наблюдается в зоне максимума избыточного порового давления.

В табл. 4 представлено сравнение длительности рассеивания порового давления, полученной с помощью аналитического и численного методов. Исходные данные для аналитического расчета (на-

чальное и конечное поровое давление) были приняты из результатов численного моделирования НДС плотины. Из сравнения следует, что по результатам численного моделирования рассеивание порового давления происходит несколько быстрее, чем по расчету аналитическим методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам численного моделирования процесс консолидации грунта в ядре каменно-земляной плотины завершается примерно в 2 раза быстрее, чем это предсказывает элементарный аналитический метод, основанный на теории фильтрационной консолидации. Это объясняется тем, что в аналитическом методе принято упрощающее допущение, что консолидация достигается только за счет фильтрации воды в направлении к дренажу. В реальности движение воды происходит более сложным образом, а консолидация протекает неравномерно по объему ядра. В верхней части ядра, в которой поровое давление изначально ниже, а ширина ядра меньше, консолидация завершается быстрее. Поэтому в нижней части ядра фильтрационный поток имеет возможность двигаться не только в дренаж, но и в зоны с низким поровым давлением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Akhtarpour A., Salari M. The deformation mechanism of a high rockfill dam during the construction and first impounding // Scientia Iranica. 2020. Vol. 27. Issue 2. Pp. 566–587. DOI: 10.24200/sci.2018.20778
2. Sainov M.P. Assessment of crack resistance of ultra-high earth core rockfill dam by pore pressure // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 6 (114). DOI: 10.34910/MCE.114.11. EDN BACLUE.

3. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Nikolaev V.B. Field Observations of Soil Settlements, Displacements, and Pore Pressure in Dams // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 51. Issue 6. Pp. 611–620. DOI: 10.1007/s10749-018-0881-9
4. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Burenkov P.M. Pore Pressure Dissipation in the Core of the Nurek Dam // Power Technology and Engineering.

2016. Vol. 50. Issue 1. Pp. 54–59. DOI: 10.1007/s10749-016-0658-y

5. Wu Y., Zhang B., Yu Y., Zhang Z. Consolidation analysis of Nuozhadu high earth-rockfill dam based on the coupling of seepage and stress-deformation physical state // *International Journal of Geomechanics*. 2016. Vol. 16. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000555

6. Salari M., Akhtarpour A., Ekramifard A. Hydraulic fracturing: a main cause of initiating internal erosion in a high earth-rock fill dam // *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 15. Issue 2. Pp. 207–219. DOI: 10.1080/19386362.2018.1500122

7. Komasi M., Beiranvand B. Study of Hydraulic Failure Mechanism in the Core of Eyvashan Earth Dam with the Effect of Pore Water Pressure and Arching // *Journal of Stress Analysis*. 2020. Vol. 4. Issue 2. Pp. 55–67. DOI: 10.22084/jrstan.2020.20022.1110

8. Ma H., Chi F. Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams // *Engineering*. 2016. Vol. 2. Issue 4. Pp. 498–509. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.001

9. Lv X., Chi S. Strain Analysis of the Nuozhadu High Rockfill Dam during Initial Impoundment // *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2018/7291473

10. Hosseini S.M.M.M., Fard R.A. Pore pressure development in the core of earth dams during simultaneous construction and impounding // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2003. Vol. 8.

11. Razavi B., Parehkar M., Gholami A. Investigation on Pore Water Pressure in Core of Karkheh Dam // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2011. Vol. 5. Issue 11. Pp. 539–542. DOI: 10.5281/zenodo.1335522

12. Balanji S.G., Davoudi S., Merufinia E. Investigation the Effects of Pore Water Pressure and Arching on Karkheh Earth Dam Considering the Instrumentation Results // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8. Issue 12. Pp. 1345–1353.

13. Emadali L., Motagh M., Haghighi M.H. Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 143. Pp. 261–273. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.009

14. Feng R., He Y.L., Cao X.X. Different deformation patterns in high core wall rockfill dams: A case

study of the Maoergai and Qiaopi dams // *Advances in Civil Engineering*. 2019. Vol. 2019. Issue 1. DOI: 10.1155/2019/7069375

15. Guo Q., Pei L., Zhou Z., Chen J., Yao F. Response surface and genetic method of deformation back analysis for high core rockfill dams // *Computers and Geotechnics*. 2016. Vol. 74. Pp. 132–140. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.01.001

16. Farajniya R., Poursorkhabi R.V., Zarean A., Dabiri R. Analysis and monitoring of the behavior of a rock fill dam ten years after construction: a case study of the Iran-Madani Dam // *Geoenvironmental Disasters*. 2024. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1186/s40677-024-00295-4

17. Ничипорович А.А., Цыбульник Т.И. Одномерная задача консолидации глинистого грунта при напряженном состоянии, соответствующем случаю плоской деформации // *Труды ВОДГЕО, Гидротехника*. 1972. № 34.

18. Rashidi M., Heidar M., Azizyan Gh. Numerical Analysis and Monitoring of an Embankment Dam During Construction and First Impounding (Case Study: Siah Sang Dam) // *Scientia Iranica*. 2018. Vol. 25. Issue 2. Pp. 505–516. DOI: 10.24200/sci.2017.4181

19. Sari U.C., Wardani S.P.R., Partono W. Influence of pore water pressure to seepage and stability of embankment dam (case study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia) // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 101. P. 05007. DOI: 10.1051/mateconf/201710105007

20. Soroush A., Pourakbar M., Nabizadeh A. 3D numerical analyses of behavior of a high rockfill dam with clay core in narrow canyon // *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019.

21. Ramsheh F.A., Rashidell A., Dias D. FDM analysis of earth dams — end of construction and water seepage (case study: Ivshan Iran dam) // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1973. Issue 1. P. 012201. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012201

22. Саинов М.П., Болдин А.А. Формирование порового давления в ядре каменно-земляной плотины от собственного веса // *Гидротехника*. 2024. № 2 (75). С. 10–14. EDN WEKFRK.

23. Саинов М.П., Болдин А.А. Оценка методик расчета порового давления в ядре каменно-земляной плотины // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2024. Т. 312. С. 115–126. EDN RKTLYG.

Поступила в редакцию 10 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 15 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 26 декабря 2024 г.

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

Александр Анатольевич Болдин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2445-9890, ORCID: 0000-0003-3561-8612; alex.boldin2012@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Excess pore pressure in the soil core of an earth-rock dam occurs due to its compaction when subjected to external loads (primarily from its own weight). Over time, pore pressure “dissipates”, i.e. decreases to a level corresponding to the pressure of filtration water; this process is called soil *consolidation*. The presence of excess pore pressure poses a threat to the safety of the dam, as it reduces the shear strength of the soil and provokes hydraulic rupture of the core. This effect is demonstrated by computational studies [1, 2] devoted to the formation of the stress-strain state (SSS) of rock-fill dams. When designing rock-fill dams, it is important to predict the duration of the core soil consolidation process, during which the dam may have a reduced level of safety.

The processes of pore pressure formation and dissipation in the core of rock-fill dams began to be studied in the mid-20th century, as it was during this period that dams of this type began to be actively used for the construction of high-pressure hydraulic structures. Such studies were carried out using field measurements and theoretical calculations.

Work [3] publishes data on field measurements of pore pressure in several dams built in the 20th century. The results of field observations of the ultra-high dam at the Nurek Hydroelectric Power Plant [4] are described. Publications [1, 5, 6] present the results of pore pressure monitoring in modern high rock-fill dams. Paper [1] is devoted to the study of pore pressure in the Masjed-e-Soleyman dam (height $H = 177$ m, Iran, 2002), [5] — in the Nuozhadu dam ($H = 261.5$ m, China, 2012), [6] — in the Bidvaz dam ($H = 66$ m, Iran).

Analysis of the results of field measurements [3] shows that the process of soil consolidation in the core of different dams occurred at different rates. In many dams (Aswan, Pachkamar, Charvak, Eyvashan), soil consolidation proceeded rapidly and the pore pressure at the beginning of the operational period was comparable to the hydrostatic pressure [3, 7]. In contrast, in the core of the Talbingo dam ($H = 162$ m, Austria, 1971), the pore pressure reached significant values and dissipated slowly [3]. This is attributed to the fact that the core of this dam is made of clay.

The forecast for the duration of consolidation is particularly relevant for the construction of new rock-fill dams. Statistics show that several new ultra-high and high rock-fill dams have been built in the 21st century. The San Roque Dam ($H = 210$ m, Philippines, 2003),

Tehri Dam ($H = 260.5$ m, India, 2006), Nuozhadu Dam ($H = 261.5$ m, China, 2012) [8, 9, 5], Changheba ($H = 240$ m, China, 2017), with heights exceeding 200 m. High dams include Karkheh ($H = 127$ m, Iran, 2001) [10–12], Masjed-e-Soleyman ($H = 177$ m, Iran, 2002) [1, 13], Qiaoqi ($H = 125.5$ m, China, 2006) [14], Pubugou ($H = 186$ m, China, 2010) [15], Maoergai ($H = 147$ m, China, 2011) [14], Upper Gotvand ($H = 180$ m, Iran, 2012), Madani ($H = 91$ m, Iran, 2014) [16]. The results of field measurements of pore pressure in some of these dams are published in [1, 5].

Pore pressure is also studied using calculation methods based on consolidation theory. The founder of consolidation theory is K. Terzaghi, who was the first to propose equations describing this process. In the USSR, A.A. Nichiporovich and T.I. Tsybulnik [17] developed an analytical method for calculating soil consolidation in the core of a rock-fill dam.

Currently, consolidation problems are solved using numerical modelling. For example, publications [1, 5, 7, 18–21] are devoted to numerical studies of stress-strain behaviour and pore pressure in the cores of rock-fill dams. In most cases, computational studies show that soil consolidation in the core is completed fairly quickly.

However, the accuracy of computational predictions depends on the quality of the initial calculation data. In [5], the pore pressure in the core of the Nuozhadu dam is considered, and it is shown that adequate calculation results are obtained when the filtration coefficient is $(1.5 - 5) \cdot 10^{-9}$ cm/s, which is much less than that measured in nature. It has been suggested that the decrease in soil permeability is associated with its compaction under the action of loads [5]. A similar effect is also described in study [4] in relation to the core of the Nurek dam.

However, this effect is only one manifestation of the interconnection between soil consolidation processes and the formation of the structure's internal stress state. Based on the results of research, it has been concluded that due to the interconnection with the stressed and deformed state of the soil, its consolidation processes are complex in terms of time and space [5]. This conclusion is also confirmed by the results of studies by the authors [22, 23]. It has been shown that the nature of the deformation of the structure under load is decisive for the magnitude of pore pressure in the core. Calculations have demonstrated that, due to expansion deformations, most of the excess pore

pressure dissipates before the reservoir is filled. Only numerical modelling makes it possible to take into account the influence of the nature of the structure’s deformation on the formation of pore pressure.

However, previous works by the authors of this study only considered the dam construction stage, when pore pressure forms in the core under the action of external loads, and did not consider the operation stage, during which pore pressure dissipates.

In this regard, it is interesting to use numerical modelling to study the process of soil consolidation and to compare the forecast of the duration of consolidation based on the results of analytical and numerical calculations.

The analytical method, based on the theory of filtration consolidation, takes into account that pore pressure dissipation occurs only due to fluid outflow (filtration). From the solution of the problem of consolidation of a layer of low-permeability soil obtained by K. Terzaghi, a formula can be derived to determine the duration of consolidation. This is the time required to reduce the pore pressure from the maximum p_1 to the filtration water pressure p_2 . For a point located at the maximum distance from the drainage (in the middle of the layer), the following approximate formula for determining the duration Δt of consolidation is obtained:

$$\Delta t = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot g}{K \cdot k_f} \cdot h^2 \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right), \tag{1}$$

where ρ is the density of water; K is the modulus of volumetric deformation of soil; k_f is the filtration coefficient; h is the filtration path length (half-thickness of the layer); p_1 and p_2 are the pore pressures at the beginning and end of the time interval, respectively.

This approximate formula expresses the influence of the main factors on the duration of consolidation and is easy to understand. As can be seen from the formula, longer consolidation is characteristic of high rock-fill dams, in which the core width $2h$ is large and the initial pore pressure can reach high values. It is clear from the formula that the duration of filtration will vary in different areas of the core, with filtration completing faster in the upper part than in the lower part. However, the decisive factor for the duration of consolidation is the permeability of the soil — which is inversely proportional to the filtration coefficient.

MATERIALS AND METHODS

The duration of soil consolidation in the core was also estimated using numerical modelling. The processes of pore pressure formation and dissipation were modelled together with the processes of SSS formation and the filtration regime of the dam.

The calculation was performed using the example of an ultra-high rock-fill dam with a central core of average width. These characteristics correspond to the design of the Nurek HPP dam. The dam is 300 m high. The maximum head that the core can withstand is 263.5 m, and the width of the core at the bottom is 143.5 m.

The calculation was performed using the finite element method with the MIDAS computer software package.

The finite element model of the dam cross-section used for the calculations has 6,975 nodes and 6,906 finite elements (Fig. 1).

The calculations were performed taking into account the sequence of dam construction and reservoir filling. It was assumed that the structure would be built

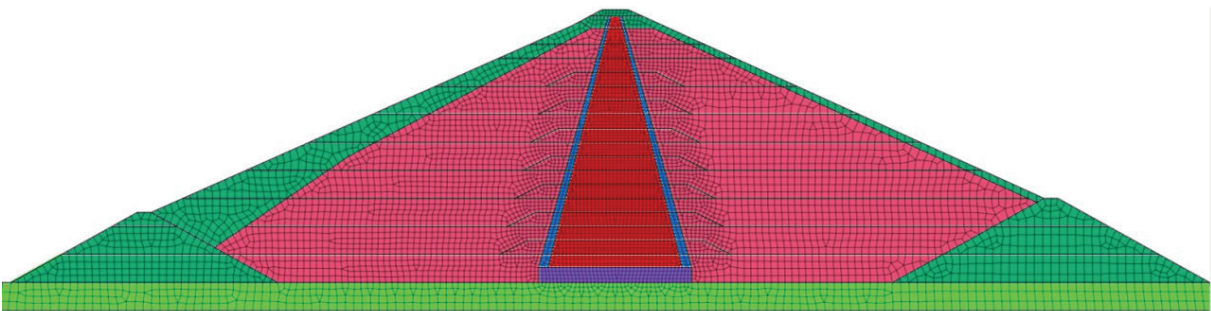


Fig. 1. Finite element model of the calculated dam cross-section

Table 1. Calculated physical and mechanical characteristics of soils

Material	Density in dry condition ρ_d , t/m ³	Density in water-saturated state ρ_{sat} , t/m ³	Modulus of linear deformation E , MPa	Poisson’s ratio ν
Sandy loam	2.10	2.28	40	0.32
Soils of transition zones	2.10	2.20	55	0
Gravel-pebble soil of resistant prisms	2.16	2.35	150	0.27
Rock mass	1.96	2.22	150	0.27

over a period of 9 years and that the reservoir would be filled in parallel with the filling of the embankment.

The calculation considered loads from the soil’s own weight, and the effect of the aquatic environment was taken into account only in the form of pore pressure and the filtration forces it creates.

The Coulomb-Mohr model, which provides for linear deformation of the soil, was used to model the behaviour of the soil. The physical and mechanical properties of the soil used in the calculation are given in Table 1.

RESEARCH RESULTS

Calculations were performed for several variants of core soil permeability. The filtration coefficient was taken to be equal to: in variant No. 1 — $1 \cdot 10^{-6}$ cm/s, in option No. 2 — $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s, in option No. 3 — 1×10^{-8} cm/s, in option No. 4 — $5 \cdot 10^{-9}$ cm/s.

Stress-strain state at the time of completion of construction

For each option, the displacements, stresses and pore pressure in the dam were determined and analyzed. They are shown in Fig. 2–8. The displacements are given taking into account the sequence of construction and loading of the structure; they represent the sum of the displacements obtained by the structure at each

stage of construction/loading. Stresses were analyzed as effective (only for the solid soil skeleton) and total (sum of the solid and liquid phases of the soil).

The dam’s internal forces are similar in all variants and, at the time of completion of construction, have the following general characteristics:

- the structural settlements U_y of the dam reach their maximum in the central part of the core and amount to about 1 % of its height (Fig. 2);
- horizontal displacements U_x of the dam are directed towards the lower reach and reach their maximum in the core, while the large volume of the upper retaining prism has displacements close to 0 (Fig. 3);
- the distribution of total vertical stresses σ_y shows an arch effect (i.e., the effect of the core “hanging” on the resisting prisms) — there is a deficit of compressive stresses in the core, while zones of compressive stress concentration occur in the resisting prisms (Fig. 4);
- for the distribution of total horizontal stresses σ_x is characterized by a lower level of compression in the lower retaining prism compared to the core (Fig. 5). There is no jump in horizontal stress values at the boundary between the core and the upper pressure prism, since the core is considered permeable and the pressure of the upper head acts in the form of filtration forces distributed throughout the volume, rather than in the form of hydrostatic pressure on the core edge;

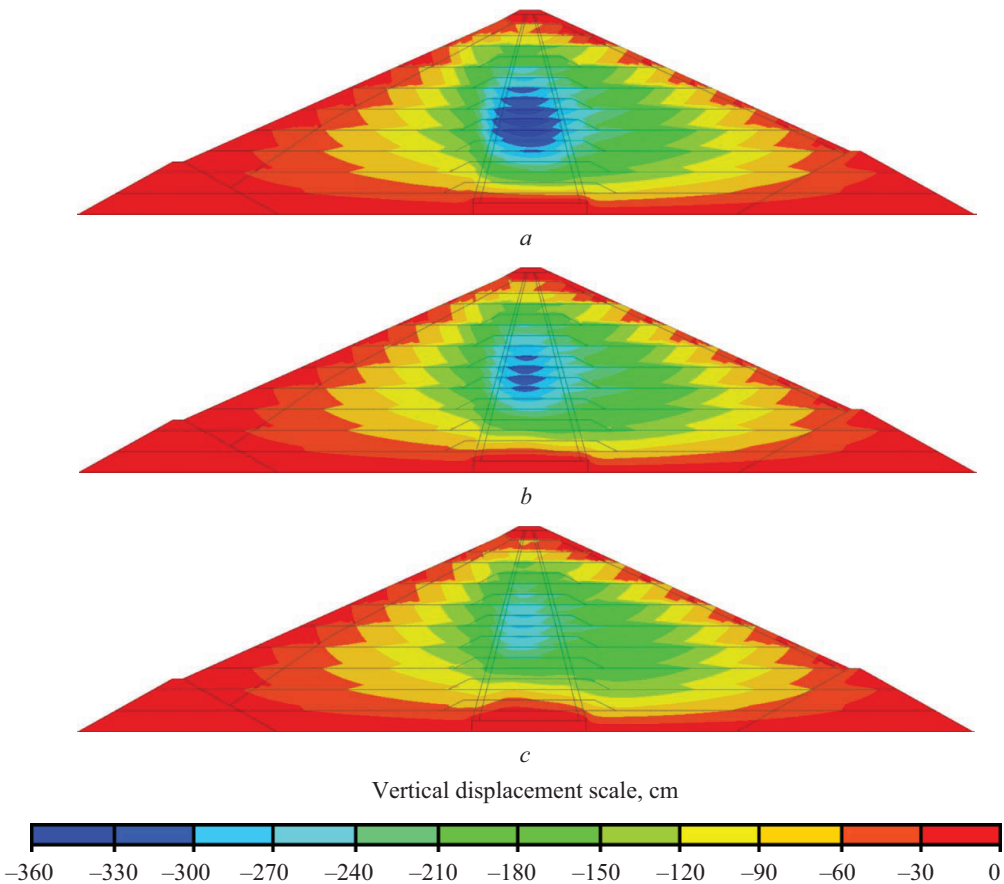


Fig. 2. Dam settlement at the end of construction for different soil permeability options: a — option No. 1; b — option No. 2; c — option No. 3

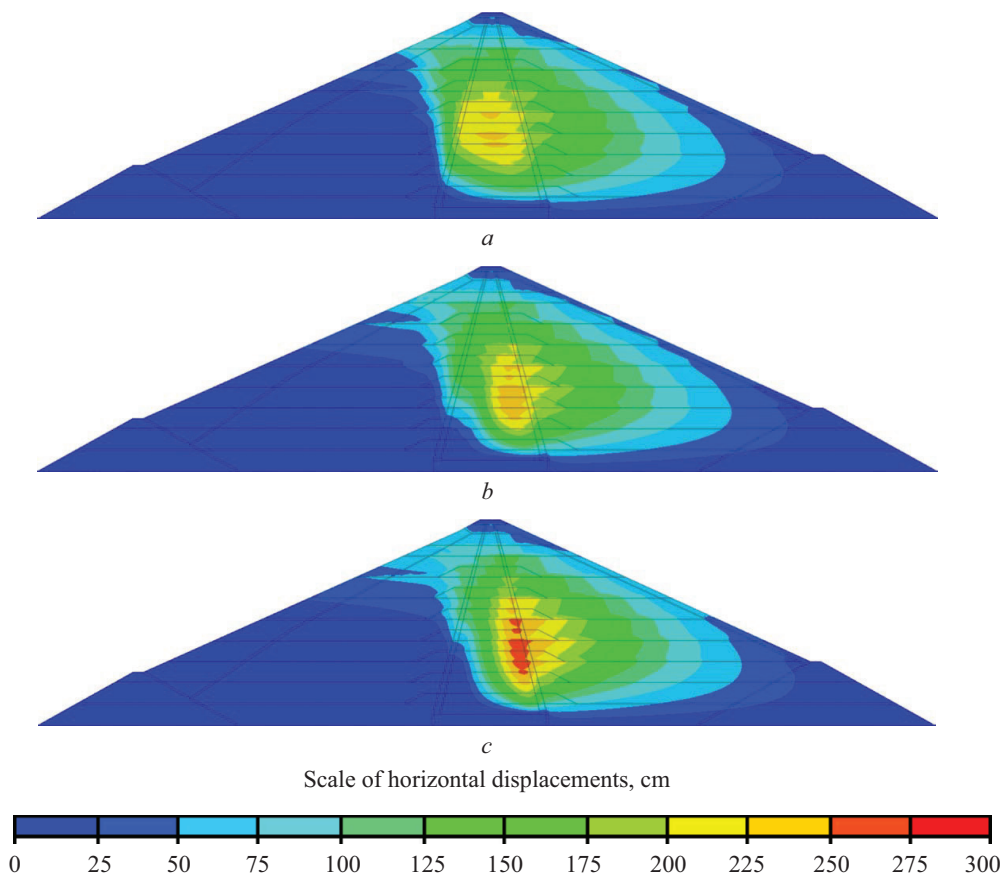


Fig. 3. Horizontal displacements of the dam at the end of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3

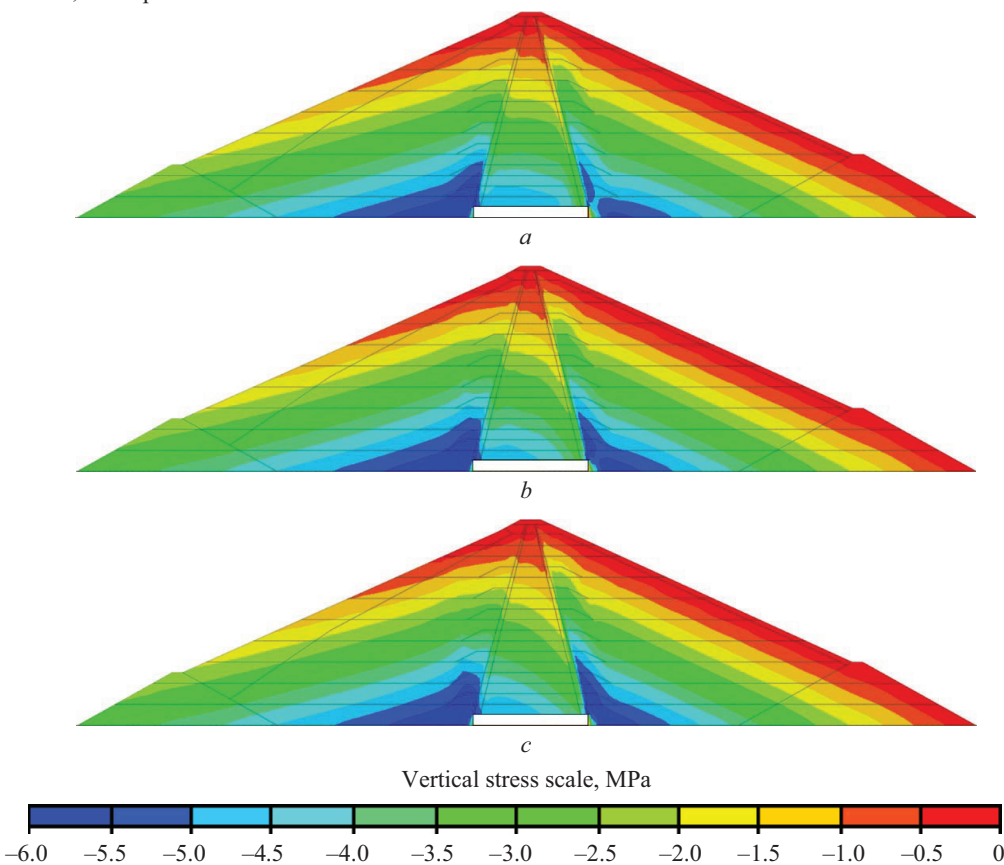


Fig. 4. Vertical total stresses in the dam at the time of completion of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3

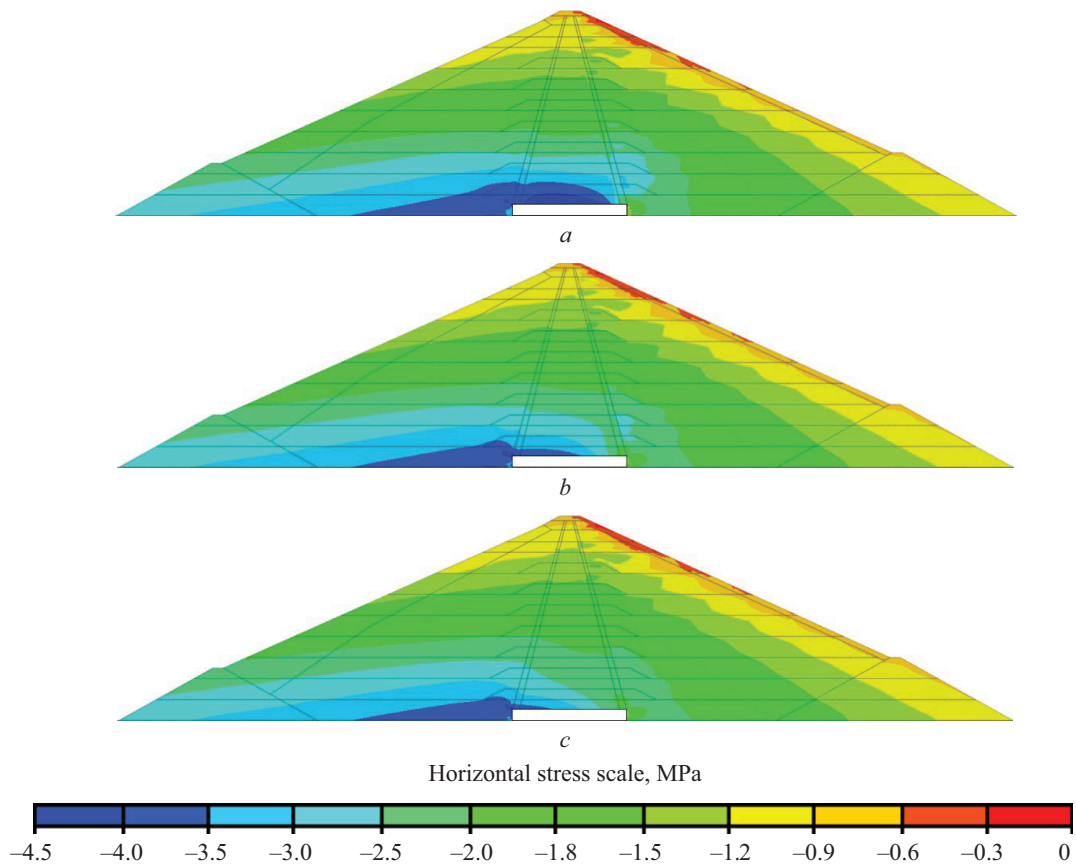


Fig. 5. Horizontal total stresses in the dam at the end of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3

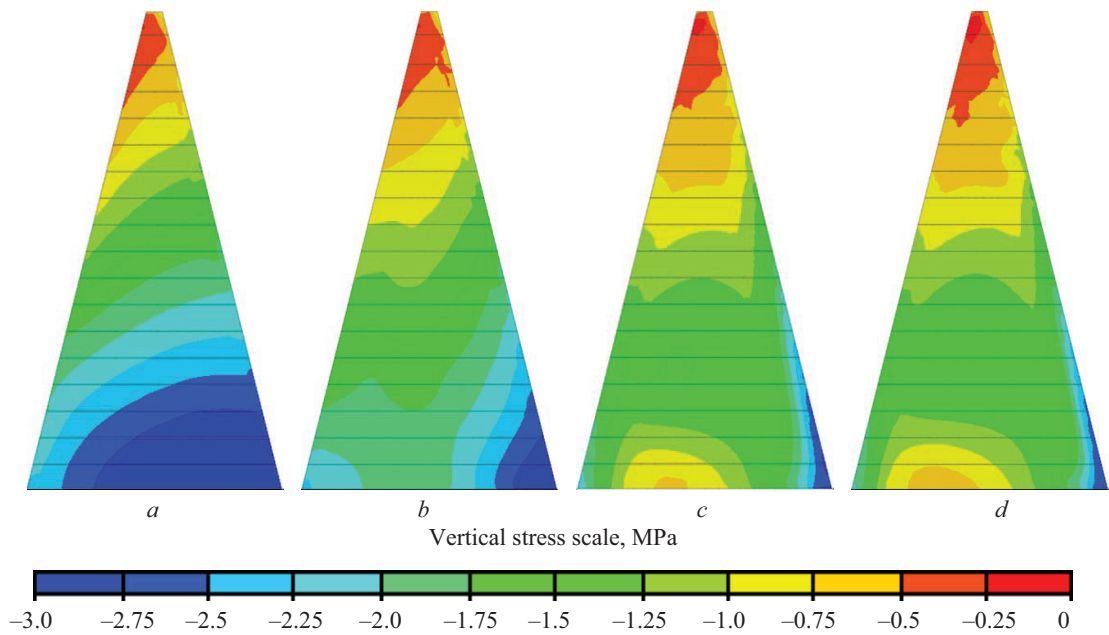


Fig. 6. Vertical effective stresses in the dam core at the time of completion of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3; *d* — option No. 4

• the effective stresses in the core (Fig. 6, 7) are significantly lower than the total stresses (Fig. 4, 5) due to the high pore pressure values in the core (Fig. 8).

However, the SSS of the dam in the considered variants also has significant differences. They are caused by differences in the conditions of formation and values of pore pressure in the core.

In option No. 1, in which the core soil has high permeability ($k_f = 1 \cdot 10^{-6}$ cm/s), soil consolidation is completed by the start of the operational period. Fig. 8

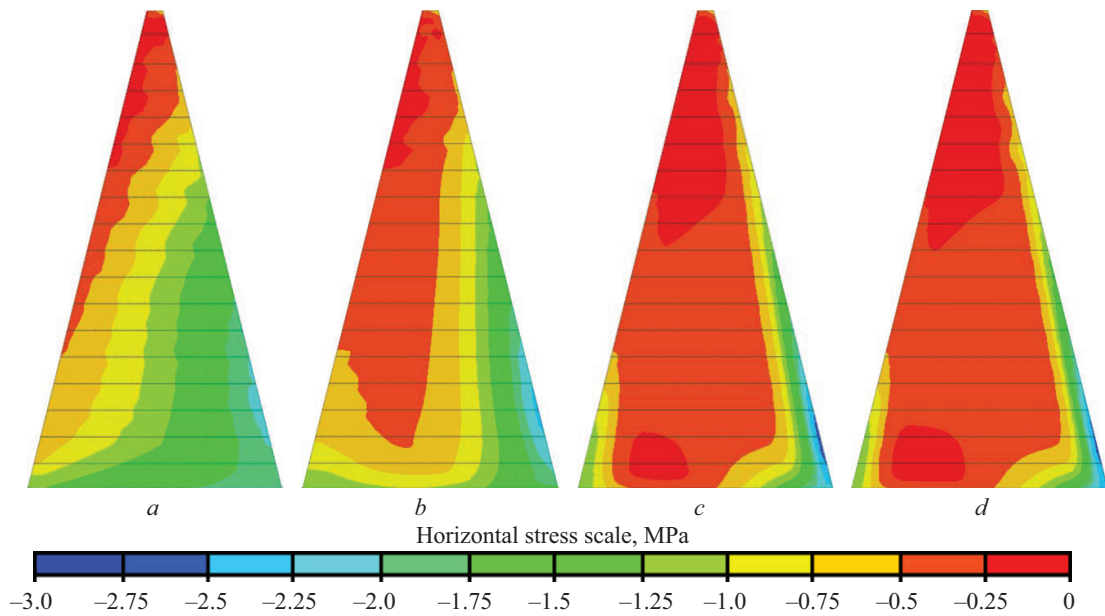


Fig. 7. Horizontal effective stresses in the dam core at the time of completion of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3; *d* — option No. 4

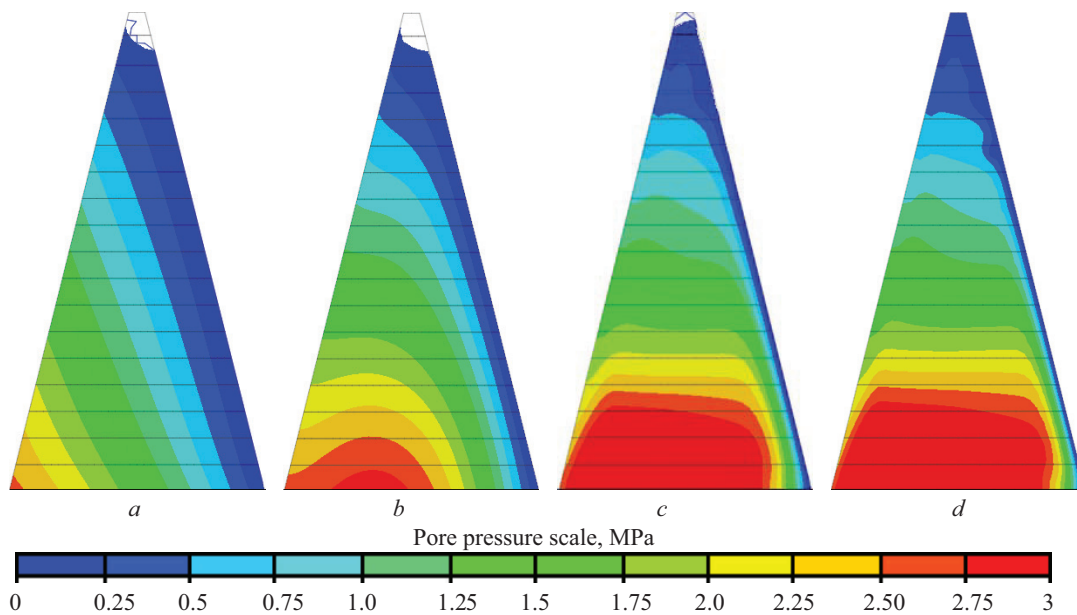


Fig. 8. Pore pressure in the dam core at the end of construction for different soil permeability options: *a* — option No. 1; *b* — option No. 2; *c* — option No. 3; *d* — option No. 4

a shows that at the start of the operational period, there is no excess pore pressure in the core — the pore pressure corresponds to the established filtration regime. The maximum pore pressure of 2.6 MPa is observed in the lower left corner (Fig. 8, *a*) and decreases from bottom to top and from the upper edge to the lower edge.

Due to the low pore pressure, the core is in a favourable stress state. The effective stresses (stresses in the skeleton) in the core are compressive everywhere, and in most of the core they are quite large and exceed 0.5 MPa. The effective stresses σ_y in the vertical direction are much greater than in the horizontal direction.

Vertical stresses σ_y reach 3 MPa (Fig. 7, *a*), while horizontal stresses do not exceed 2 MPa (Fig. 8, *a*).

The total stresses σ_y in the core do not exceed 5.0 MPa (Fig. 4, *a*).

According to calculations, the maximum construction settlement of the core in option No. 1 was 360 cm (Fig. 2, *a*), and the maximum displacement was 234 cm (Fig. 3, *a*). The zone of maximum displacement is located in the centre of the core.

For other options No. 2–4 with lower soil permeability of the core, excessive pore pressure occurs in the core. This significantly affects the stress-strain state

of the core and the entire dam. The effect of excessive pore pressure is expressed as follows:

- the lower the filtration coefficient of the core soil, the higher the pore pressure and the lower the effective compressive stresses in the core;
- the lower the filtration coefficient of the core soil, the less displacement and settlement of the dam at the time of completion of construction.

In option No. 2 ($k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ cm/s), the excess pore pressure in the core is small compared to the filtration pressure. At the time of completion of construction, the maximum pore pressure value was 2.87 MPa (Fig. 9, *b*), i.e. 10 % higher than in option No. 1. The distribution of effective stresses in option No. 2 is close to that characteristic of option No. 1. However, in Fig. 6, *b*; 7, *b*, there is a noticeable decrease in compressive stresses σ_x and σ_y in the core.

The dam deformations in option No. 2 differ from those in option No. 1. The construction settlements U_y of the dam are slightly smaller than in option No. 1. The maximum settlement of the dam in option No. 2 is 3.28 m (Fig. 2, *b*), which is 9 % less than in option No. 1. On the contrary, the horizontal displacements U_x of the dam in option No. 2 are greater than in option No. 1 (Fig. 3, *b*). The maximum displacement in option No. 2 was 2.48 m, i.e. 6 % higher than in option No. 1. The zone of maximum displacement is located in the lower part of the core.

In variants with low soil permeability of the core (variant No. 3, $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ cm/s and No. 4 $k_f = 5 \times 10^{-9}$ cm/s), the dam's stress-strain state differs significantly from that of the dam in variant No. 1.

In these variants, the excess pore pressure is much greater than the filtration pressure. The pore pressure is particularly high in the lower part of the core. In variant No. 3, the pore pressure reaches 4.2 MPa (Fig. 9, *c*), and in variant No. 4, it reaches 4.3 MPa (Fig. 9, *d*). Practically all of the vertical load is absorbed by the pore pressure.

Due to slow consolidation, the core soil has lower compressibility and higher deformability when changing shape (under shear). Due to lower compressibility, dam settlement is significantly lower than in option No. 1. The maximum settlement in option No. 3 was 2.79 m (Fig. 2, *c*), and in option No. 4 — 2.72 m. It is approximately 22 % less than the settlement in option No. 1. Due to greater tendency to deformation, the dam acquires greater displacements. The maximum displacement in option No. 3 was 2.76 m (Fig. 3, *c*), and in option No. 4 — 2.83 m. It is approximately 20 % greater than in option No. 1.

The change in the nature of the deformations also entails a change in the stress distribution. Option No. 3 is characterized by a reduced level of compression in the core in terms of total and effective stresses. In terms of total stresses, this reduction is negligible (Fig. 4, *c*; 5, *c*), but in terms of effective stresses, it is very significant.

Variants 3 and 4 are characterized by the presence of a large zone of relatively low (less than 0.5 MPa) compressive stresses σ_x in the core (Fig. 6, *c*, *d*). In the upper and lower parts of the core, there are zones with compressive stresses of less than 0.25 MPa. According to the vertical stresses σ_y , there is also a zone of reduced compressive stresses in the lower part of the core (Fig. 7, *c*, *d*). Such a stress state of the core is unfavourable and carries the risk of discontinuities forming in the core.

Consolidation of the core soil and changes in the stress-strain state of the dam over time

In order to establish the duration of the soil consolidation process, a calculation of the change in the stress-strain state of the dam for a period of 100 years was performed. The results of this calculation for options 1–4 are shown in Fig. 9–12. Fig. 9 shows the distribution of pore pressure in the core at a number of time points, while Fig. 10 and 11 show the distribution of ef-

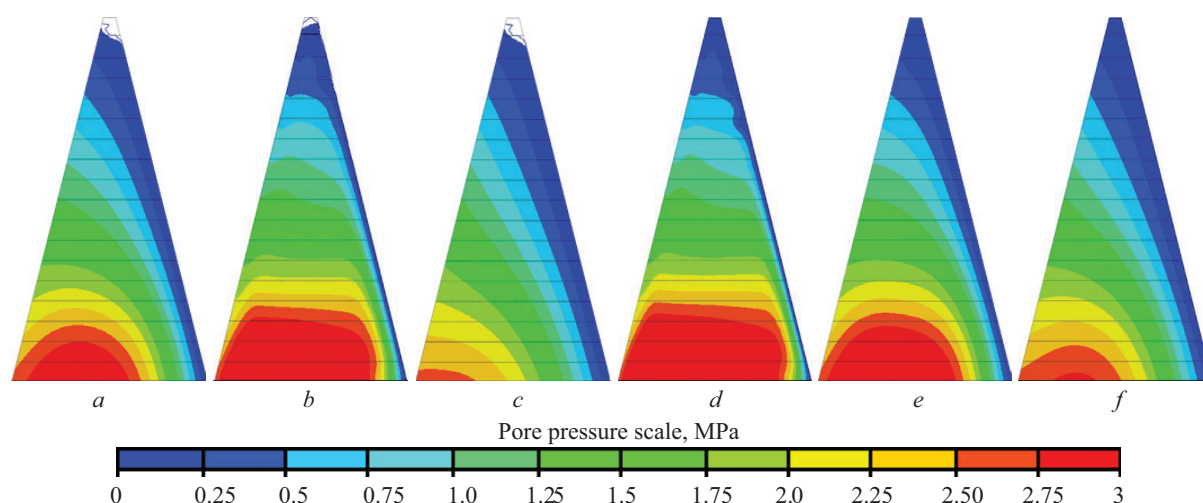


Fig. 9. Change in pore pressure in the core over time for two soil permeability options: *a*, *b*, *c* — option No. 3 (with a filtration coefficient of $1 \cdot 10^{-8}$ cm/s); *d*, *e*, *f* — option No. 4 (with a filtration coefficient of $5 \cdot 10^{-9}$ cm/s); *a*, *d* — at the beginning of the operating period ($t = 0$); *b*, *e* — after 30 years of operation; *c*, *f* — after 100 years of operation

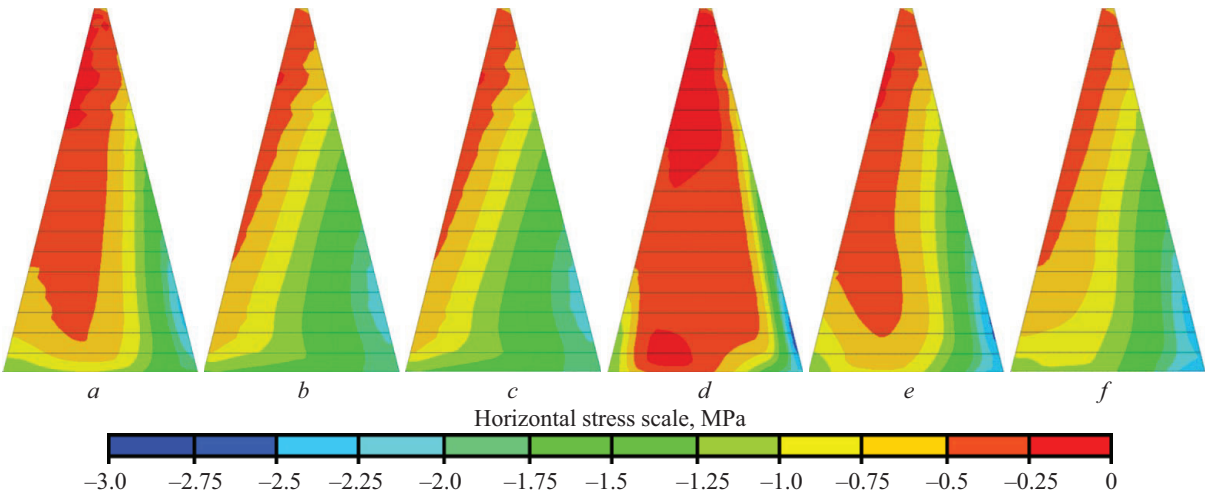


Fig. 10. Change in horizontal effective stresses in the core over time for two soil permeability options: *a, b, c* — option No. 3 (with a filtration coefficient of $1 \cdot 10^{-8}$ cm/s); *d, e, f* — option No. 4 (with a filtration coefficient of $5 \cdot 10^{-9}$ cm/s); *a, d* — at the beginning of the operating period ($t = 0$); *b, e* — after 30 years of operation; *c, f* — after 100 years of operation

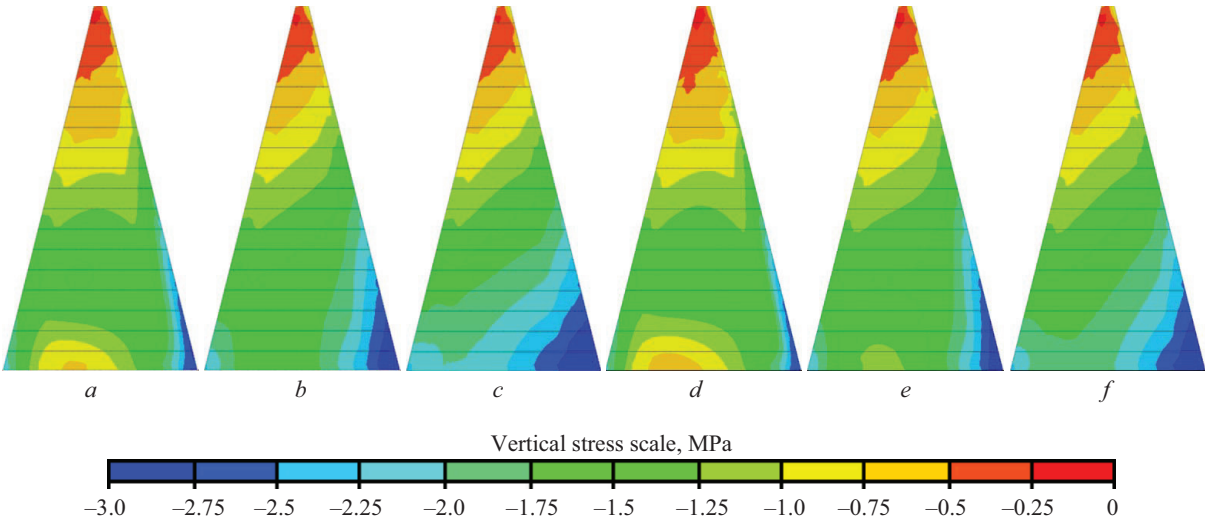


Fig. 11. Change in vertical effective stresses in the core over time for two soil permeability options: *a, b, c* — option No. 3 (with a filtration coefficient of $1 \cdot 10^{-8}$ cm/s); *d, e, f* — option No. 4 (with a filtration coefficient of $5 \cdot 10^{-9}$ cm/s); *a, d* — at the beginning of the operating period ($t = 0$); *b, e* — after 30 years of operation; *c, f* — after 100 years of operation

fective stresses. Fig. 12 shows a graph of the change in the maximum pore pressure over time.

In option 1, there are no changes in SSS during the operational period, as soil consolidation was completed during the construction period.

Fig. 9–12 clearly show that over time, pore pressure gradually dissipates (Fig. 9) and effective compressive stresses increase (Fig. 10, 11). However, the duration of this process varies depending on the permeability of the core soil. In option 2, it takes several years, after which the pore pressure becomes equivalent to the filtration pressure (Fig. 9, *b*). In variants 3 and 4, even after 30 years of operation, the pore pressure changes little (Fig. 10, *b, e*), and in the lower part of the core it remains high even after 100 years (Fig. 10, *c, f*). Accordingly, in these variants, the risk of developing core discontinuities remains for a long time.

The change in the core's SSS is accompanied by additional dam movements. Dam settlements increase, tending towards the values characteristic of option No. 1 (Table 2). The dam settlement in option No. 2 after 100 years approximately corresponds to the dam settlement in option No. 1. In options 3 and 4, the maximum settlements increase by approximately 20 % compared to the initial ones, but do not reach the values characteristic of option 1.

Horizontal displacements in option No. 2 remain virtually unchanged over 100 years (Table 2). In options No. 3 and 4, on the contrary, there is a slight decrease (approximately 5 %) in the maximum values of horizontal displacements during the operational period.

Fig. 12 clearly shows the duration of the consolidation process based on the results of numerical modelling. In option 2, consolidation is completed in approxi-

Table 2. Change in maximum dam displacements over time

Option number	Filtration coefficient, cm/s	Maximum settlement, m		Maximum displacement, m	
		0 years	100 years	0 years	100 years
1	$1 \cdot 10^{-6}$	3.6	3.61	2.34	2.37
2	$1 \cdot 10^{-7}$	3.28	3.69	2.48	2.49
3	$1 \cdot 10^{-8}$	2.79	3.44	2.76	2.60
4	$5 \cdot 10^{-9}$	2.72	3.23	2.83	2.66

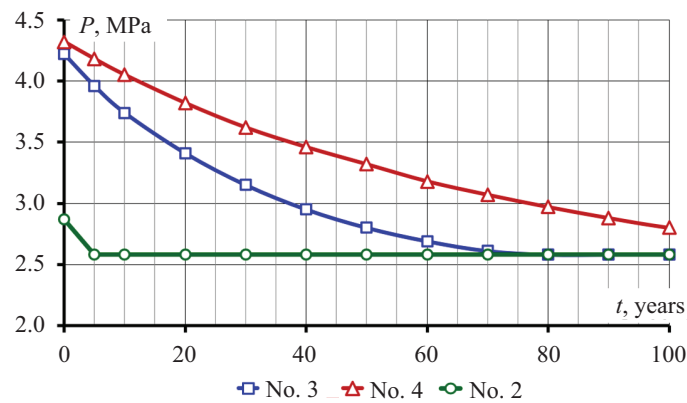


Fig. 12. Change in the maximum pore pressure over time for different soil permeability options in the core

Table 3. Results of calculating the consolidation period using the analytical method

Option number	Filtration coefficient, cm/s	Duration of consolidation at initial pressure	
		2.5 MPa	4.5 MPa
1	$1 \cdot 10^{-6}$	1.0	1.9
2	$1 \cdot 10^{-7}$	9.7	19.5
3	$1 \cdot 10^{-8}$	96.7	195
4	$5 \cdot 10^{-9}$	193	390

mately 5 years, in option 3 it lasts about 80 years, and in option 4 it is not completed even after 100 years.

In this regard, it is interesting to compare the results of numerical modelling with the results of analytical calculations.

Calculation of the duration of the consolidation process using an analytical method

The calculation using a simple analytical method consisted of using formula (1), obtained according to K. Terzaghi’s theory. It was performed for the lower section of the core, for which the half-width is approximately $h = 70$ m. The modulus of volumetric deformation of the soil was taken to be equal to $K = 37$ MPa,

which corresponds to the specified values of the modulus of linear deformation and Poisson’s ratio.

Table 3 shows the calculated duration of pore pressure dissipation for several combinations of core soil permeability and initial pore pressure p_1 . The final value of pore pressure to which it decreases was taken as $p_2 = 1.4$ MPa. This is the maximum value of filtration pressure observed in the zone of maximum excess pore pressure.

Table 4 shows a comparison of the duration of pore pressure dissipation obtained using analytical and numerical methods. The initial data for the analytical calculation (initial and final pore pressure) were taken

Table 4. Comparison of consolidation duration calculations using analytical and numerical methods

Option number	Filtration coefficient, cm/s	Calculation of consolidation duration using the analytical method			Duration of consolidation based on numerical modelling results, years
		p_2 , MPa	p_1 , MPa	t , years	
1	$1 \cdot 10^{-6}$	2.6	2.6	374	150
2	$1 \cdot 10^{-7}$	2.87	1.4	183	80
3	$1 \cdot 10^{-8}$	4.2	1.4	12	3
4	$5 \cdot 10^{-9}$	4.3	1.4	0	0

from the results of numerical modelling of the dam's stress-strain state. The comparison shows that, according to the results of numerical modelling, pore pressure dissipation occurs slightly faster than according to the analytical calculation.

CONCLUSION AND DISCUSSION

According to the results of numerical modelling, the soil consolidation process in the core of a rock-fill dam is completed approximately twice as fast as predicted by the elementary analytical method based on the theory

of filtration consolidation. This is explained by the fact that the analytical method makes a simplifying assumption that consolidation is achieved only by filtering water in the direction of drainage. In reality, water movement is more complex, and consolidation proceeds unevenly throughout the core. In the upper part of the core, where the pore pressure is initially lower and the core width is smaller, consolidation is completed more quickly. Therefore, in the lower part of the core, the filtration flow can move not only towards the drainage, but also towards areas with low pore pressure.

REFERENCES

1. Akhtarpour A., Salari M. The deformation mechanism of a high rockfill dam during the construction and first impounding. *Scientia Iranica*. 2020; 27(2):566-587. DOI: 10.24200/sci.2018.20778
2. Sainov M.P. Assessment of crack resistance of ultra-high earth core rockfill dam by pore pressure. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 6(114). DOI: 10.34910/MCE.114.11. EDN BACLUE.
3. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Nikolaev V.B. Field Observations of Soil Settlements, Displacements, and Pore Pressure in Dams. *Power Technology and Engineering*. 2018; 51(6):611-620. DOI: 10.1007/s10749-018-0881-9
4. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Burenkov P.M. Pore Pressure Dissipation in the Core of the Nurek Dam. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(1):54-59. DOI: 10.1007/s10749-016-0658-y
5. Wu Y., Zhang B., Yu Y., Zhang Z. Consolidation analysis of Nuozhadu high earth-rockfill dam based on the coupling of seepage and stress-deformation physical state. *International Journal of Geomechanics*. 2016; 16(3). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000555
6. Salari M., Akhtarpour A., Ekramifard A. Hydraulic fracturing: a main cause of initiating internal erosion in a high earth-rock fill dam. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2018; 15(2):207-219. DOI: 10.1080/19386362.2018.1500122
7. Komasi M., Beiranvand B. Study of Hydraulic Failure Mechanism in the Core of Eyvashan Earth Dam with the Effect of Pore Water Pressure and Arching. *Journal of Stress Analysis*. 2020; 4(2):55-67. DOI: 10.22084/jrstan.2020.20022.1110
8. Ma H., Chi F. Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams. *Engineering*. 2016; 2(4):498-509. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.001
9. Lv X., Chi S. Strain Analysis of the Nuozhadu High Rockfill Dam during Initial Impoundment. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018; 1-12. DOI: 10.1155/2018/7291473
10. Hosseini S.M.M.M., Fard R.A. Pore pressure development in the core of earth dams during simultaneous construction and impounding. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2003; 8.
11. Razavi B., Parehkar M., Gholami A. Investigation on Pore Water Pressure in Core of Karkheh Dam. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2011; 5(11):539-542. DOI: 10.5281/zenodo.1335522
12. Balanji S.G., Davoudi S., Merufinia E. Investigation the Effects of Pore Water Pressure and Arching on Karkheh Earth Dam Considering the Instrumentation Results. *Advances in Environmental Biology*. 2014; 8(12):1345-1353.
13. Emadali L., Motagh M., Haghighi M.H. Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery. *Engineering Structures*. 2017; 143:261-273. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.009
14. Feng R., He Y.L., Cao X.X. Different deformation patterns in high core wall rockfill dams: A case study of the Maoergai and Qiaoqi dams. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019(1). DOI: 10.1155/2019/7069375
15. Guo Q., Pei L., Zhou Z., Chen J., Yao F. Response surface and genetic method of deformation back analysis for high core rockfill dams. *Computers and Geotechnics*. 2016; 74:132-140. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.01.001
16. Farajniya R., Poursorkhabi R.V., Zarean A., Dabiri R. Analysis and monitoring of the behavior of a rock fill dam ten years after construction: a case study of the Iran-Madani Dam. *Geoenvironmental Disasters*. 2024; 11(1). DOI: 10.1186/s40677-024-00295-4
17. Nichiporovich A.A., Tsybulnik T.I. One-dimensional problem of consolidating clay soil in a stressed state corresponding to the plane deformation case. *Proceedings of VODGEO, Hydrotechnics*. 1972; 34. (rus.).
18. Rashidi M., Heidar M., Azizyan Gh. Numerical Analysis and Monitoring of an Embankment Dam During Construction and First Impounding (Case Study: Siah Sang Dam). *Scientia Iranica*. 2018; 25(2):505-516. DOI: 10.24200/sci.2017.4181

19. Sari U.C., Wardani S.P.R., Partono W. Influence of pore water pressure to seepage and stability of embankment dam (case study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia). *MATEC Web of Conferences*. 2017; 101:05007. DOI: 10.1051/mateconf/201710105007
20. Soroush A., Pourakbar M., Nabizadeh A. 3D numerical analyses of behavior of a high rockfill dam with clay core in narrow canyon. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019.
21. Ramsheh F.A., Rashidell A., Dias D. FDM analysis of earth dams — end of construction and water seepage (case study: Ivshan Iran dam). *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1973(1):012201. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012201
22. Sainov M.P., Boldin A.A. Formation of pore pressure in the earth-core rockfill dam due to the dead weight. *The Hydrotechnika*. 2024; 2(75):10-14. EDN WEKFRK. (rus.).
23. Sainov M.P., Boldin A.A. Assessment of methods for calculating pore water pressure in the earth core of rockfill dam. *Proceedings of the VNIIG*. 2024; 312:115-126. EDN RKTLYG. (rus.).

Received December 10, 2024.

Adopted in revised form on December 15, 2024.

Approved for publication on December 26, 2024.

B I O N O T E S: **Mikhail P. Sainov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Structures and Hydro-Technical Installations; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 2369-9626, Scopus: 6506150284, ORCID: 0000-0003-1139-3164; SainovMP@mpei.ru;

Aleksandr A. Boldin — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2445-9890, ORCID: 0000-0003-3561-8612; alex.boldin2012@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

Панели CLT и МНМ в промышленном и гражданском строительстве

Николай Григорьевич Серегин, Артем Сергеевич Курдюков
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Указана тенденция роста строительства деревянных конструкций промышленного и гражданского назначения. Сформулирована проблема создания деревянных конструкций из стандартных пиломатериалов. Представлены современные технологические решения производства инновационных конструкций зданий и сооружений из древесины в промышленном и гражданском строительстве.

Материалы и методы. Предмет исследования — технологии CLT и МНМ, используемые для изготовления уникальных несущих конструкций в строительстве промышленных и гражданских зданий из древесины. Приведены технические характеристики панелей для строительства деревянных зданий и сооружений, примеры реализованных и реализуемых зданий и сооружений. Показаны ключевые различия производственных решений технологий изготовления панелей CLT и МНМ. Рассмотрены основные перспективы применения деревянного многоэтажного строительства.

Результаты. Проанализирована общая техническая особенность панелей CLT и МНМ, связанная с обязательным применением отделочных материалов после монтажа конструкций. Сформулированы главные преимущества и недостатки производственных решений технологий изготовления панелей CLT и МНМ.

Выводы. Несмотря на схожесть процессов изготовления панелей CLT и МНМ они отличаются тем, что панели CLT создаются путем склеивания ламелей в прессах, а панели МНМ собираются с помощью алюминиевых гвоздей. Применение технологии CLT оптимально для возведения многоэтажных зданий. Основным препятствием для массового использования МНМ-панелей в России является нехватка проведенных испытаний таких конструкций. Деревянное многоэтажное строительство из панелей CLT и МНМ — это реальность, поскольку оно соответствует современным нормам энергоэффективного строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: CLT, Cross Laminated Timber, перекрестно-клееная древесина, перекрестное склеивание, Gro Thermo, МНМ, Massiv-Holz-Mauer, многослойный хвойный массив, характеристики панелей, достоинства и недостатки CLT и МНМ, перспективы применения панелей

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Серегин Н.Г., Курдюков А.С. Панели CLT и МНМ в промышленном и гражданском строительстве // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.4

Автор, ответственный за переписку: Николай Григорьевич Серегин, SereginNG@mgsu.ru.

CLT and MHM Panels in Industrial and Civil Engineering

Nikolay G. Seregin, Artyom S. Kurdyukov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The growth trend in the construction of wooden structures for industrial and civil purposes is indicated. The problem of creating wooden structures from standard lumber is formulated. Modern technological solutions for creating innovative structures of buildings and structures made of wood in industrial and civil engineering are presented. The purpose of this research paper is given.

Materials and methods. The subject of this research is the CLT and MHM technologies used for the manufacture of unique load-bearing structures in the construction of industrial and civil buildings made of wood. The paper presents the technical characteristics of panels for the construction of wooden buildings and structures. Examples of completed and ongoing buildings and structures are considered. The main differences between the production solutions of CLT and MHM panel manufacturing technologies are formulated. The main prospects for the use of wooden multi-storey construction are considered.

Results. The general technical feature of CLT and MHM panels related to the mandatory use of finishing materials after the installation of structures is analyzed. The main advantages and disadvantages of manufacturing solutions for CLT and MHM panel manufacturing technologies are formulated separately.

Conclusions. Despite the similarity of the manufacturing processes of CLT and MHM panels, they differ in that CLT panels are created by gluing slats in presses, while MHM panels are assembled using aluminum nails. The use of CLT technology is optimal for the construction of multi-storey buildings. The main obstacle to the mass use of MHM panels in Russia is the lack of conducted tests of such structures. Wooden multi — storey construction made of CLT and MHM panels is a reality, as it meets modern standards of energy-efficient construction.

KEYWORDS: CLT, Cross Laminated Timber, cross-glued wood cross-bonding, Gro Thermo, MHM, Massiv-Holz-Mauer, multilayer coniferous wood, panel characteristics, advantages and disadvantages of CLT and MHM, panel application prospects

FOR CITATION: Seregin N.G., Kurdyukov A.S. CLT and MHM Panels in Industrial and Civil Engineering. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.4

Corresponding author: Nikolay G. Seregin, SereginNG@mgisu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции последних лет в европейских странах показывают рост использования деревянных конструкций не только для малоэтажного строительства, но и для возведения многоэтажных зданий промышленного и гражданского назначения [1, 2]. При строительстве многоэтажных зданий из древесины сталкиваются с проблемой создания конструкций с уникальными геометрическими и конструктивными характеристиками, которые невозможно изготовить из стандартных пиломатериалов. Современное строительство постоянно находится в поиске инновационных решений, способных сочетать прочность, эстетику и энергоэффективность зданий и сооружений из древесины в промышленном и гражданском строительстве. Для решения данной проблемы, а также многих других разрабатываются различные технологии изготовления деревянных конструкций.

В настоящий момент наибольшее распространение получила технология изготовления перекрестных стеновых панелей — CLT. Наряду с этой технологией существует еще одна, которая имеет очень схожую конструкцию — MHM [3–5].

Целью данной работы является исследование применения панелей CLT и MHM в промышленном и гражданском строительстве для возведения многоэтажных зданий и сооружений, изучение возможных конструктивных решений, рассмотрение технических характеристик конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

CLT (Cross Laminated Timber или перекрестно клееная древесина), другие названия: KLH, BSP, X-LAM, CROSS-LAM — технология изготовления панелей, в основу которой положено перекрестное склеивание между собой слоев ламелей из хвойных пород деревьев (рис. 1) [6, 7].

Эта технология изготовления панелей была разработана в конце 1980-х гг. и впервые использована в Германии и Австрии в начале 1990-х гг. Более широкие исследования технологии были проведены только во второй половине 1990-х гг. [8, 9].

К 2000-м гг. производство многослойных клееных деревянных панелей набрало большую популярность в европейских странах. Панели применяли для различных систем строительства одноэтажных и многоэтажных зданий [10, 11].

Для изготовления панелей CLT применяется доска хвойных пород древесины камерной сушки с влажностью 12 %. Она раскраивается на ламели необходимого сечения, которые сращиваются по длине. Далее ламели калибруются и собираются в щиты с послойным перекрестным склеиванием. После чего щиты запрессовываются для получения единой панели, которая в дальнейшем проходит процесс калибровки, шлифовки и раскроя на ЧПУ станке [12].

Эти операции требуются для получения панелей с необходимыми геометрическими параметрами, сформированными проемами, а также технологическими отверстиями. За счет перекрестного склеивания формируется панель с хорошими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами в отличие от традиционной древесины.

Габаритные размеры CLT-панелей варьируются в диапазоне: ширина — до 4 м, длина — 24 м, толщина — от 0,06 до 0,4 м [13].

Как говорилось ранее, современное строительство постоянно находится в поиске инновационных решений. Помимо стандартных панелей CLT разработаны утепленные плиты GrO Thermo, применяемые для наружных стен.

GrO Thermo — это утепленная CLT-плита, часть внутренних ламелей которой замещена древесным утеплителем. Слой утеплителя вклеивается и запрессовывается в плиту аналогично ламелям [14].

Утеплитель, используемый в панелях, на 94 % состоит из древесины, а также из экологического клея и парафина, которые добавляют для сохранения формы плиты (рис. 2).

Основные технические характеристики панелей CLT приведены в табл. 1 [15].



Рис. 1. Перекрестное склеивание панелей CLT

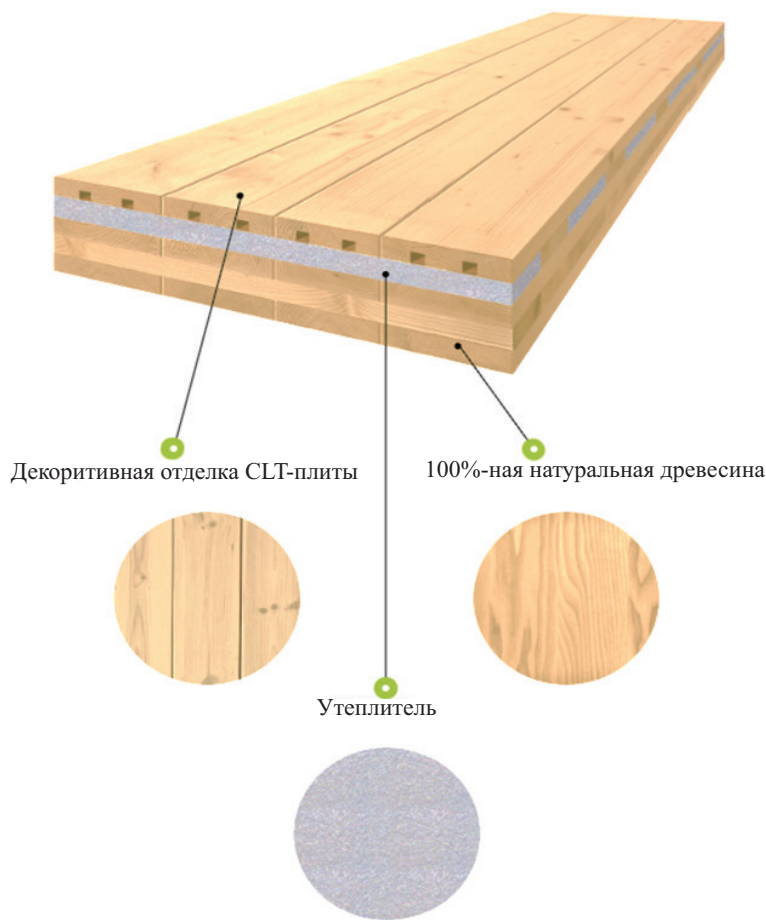


Рис. 2. Состав плит GrO Thermo

Табл. 1. Основные технические характеристики панелей CLT

Показатели	Значения показателей
Влажность панелей	12 % (+/-2 %)
Паропроницаемость поперек волокон	0,05 мг/(м·ч·Па)
Шумоизоляция	R > 60 дБ
Класс прочности	C24 (ГОСТ 33080–2014)
Теплопроводность	$\lambda = 0,13 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ (EN 12524)
Теплоемкость	$c = 1,6 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ (EN 12524)
Водостойкость	$\mu = 20\text{--}50$ (EN 12524)
Прочность на сжатие вдоль волокон	13–15 Н/мм ²
Прочность на сжатие поперек волокон	1,8 Н/мм ²
Прочность на изгиб	10 Н/мм ²
Расчетная нагрузка на стену	60 кН/м ²
Расчетная нагрузка на перекрытие	5 кН/м ²
Пожароустойчивость	D-s2, d0 (2003/43/EC)
Огнестойкость	REI 60–120 (EN 1995-1-2–2004)
Скорость обугливания	0,65 мм/мин (EN 1995-1-2)
Масса изделия	470–480 кг/м ³

Примерами наиболее известных зданий и сооружений из CLT-панелей являются [16]:

- 100-метровая башня Rocket&Tigerli в Швейцарии, по плану ее строительство должно завершиться в 2026 г.;
- комплекс Mjostarnet в Норвегии, насчитывающий 85,4 м в высоту и 18–20 этажей;

• в России это ЖК «Соколики» в г. Сокол, 4-этажный комплекс высотой 15 м и площадью 3013 м².

Далее рассмотрим технологию МНМ (Massiv-Holz-Mauer или многослойный хвойный массив) — это панели, изготавливающиеся послойно с перехлестом из обрезных досок хвойных пород толщиной 20–24 мм (рис. 3) [17].

Разработка панелей МНМ принадлежит немцу Хансу Хундедеггеру. В 2001 г. он запустил производство из неделовой древесины 3–4 сорта. Уже в сентябре 2002 г. был построен первый дом с использованием панелей МНМ.

В период с 2003 по 2019 г. в Германии из древесных плит возведено около 300 объектов. Эта технология начала широко применяться в Европе для строительства как малоэтажных, так и высотных зданий.

В России МНМ-технология появилась в 2007 г., но из-за недостатка информационной базы она не получила такой популярности как CLT, что заметно и в наше время [18].

Для производства стеновых панелей МНМ используется доска камерной сушки с влажностью 12 %, не требующая обработки антисептиком и пропитками.

Каждая доска проходит обработку на четырехстороннем станке компании Hundegger, где выпиливаются пазы, которые при соединении досок между собой образуют воздушную прослойку для высокой звукоизоляции и теплопроводности. Также на станке выпиливается боковой профиль для соединения досок между собой во избежание образования «мостиков холода». Затем доски послойно с перекрестной укладкой собираются в щиты с необходимыми размерами, которые сшиваются на алюминиевые гвозди в станках.

Выбор алюминиевых гвоздей (штифтов) обусловлен снижением повреждения и износа режущего инструмента при механической обработке.

Далее в программу ЧПУ вносятся требуемые геометрические размеры, проемы, а также технологические отверстия для труб отопления, канализации и электричества для раскроя панели.

По технологии изготовления панели являются экологически чистыми, без применения клея и других химических пропиток.

Производственная линия рассчитана на выпуск панелей размерами: высота — 3,25 м; длина — до 6 м; толщина наружных панелей стен — от 340 мм (15 слоев досок) до 160 мм (7 слоев), внутренних — 160 или 115 мм [19].

Основные технические характеристики панелей МНМ приведены в табл. 2 [20].



Рис. 3. Сечение панели МНМ

Примеры наиболее известных зданий и сооружений из МНМ-панелей [21]:

- SporX в Норвегии — 40-метровое офисное здание, при его строительстве использовано 2000 м³ цельной древесины и 500 м³ клееного бруса;
- отель Waldeck Spa Kur в Бад-Дюрхайме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Панели МНМ так же, как и CLT, имеют общую техническую особенность, связанную с обязательным применением отделочных материалов после монтажа конструкции:

- внутренняя отделка (например, дерево, гипсокартон, штукатурка) монтируется непосредственно на панель;
- внешняя отделка служит частью фасада и рассчитывается исходя из необходимого значения теплопередачи наружной конструкции здания. Отделка фасада может использоваться как с вентилируемым фасадом (рис. 4, а), так и штукатурная (рис. 4, b);
- перегородки здания имеют внутреннюю обшивку с обеих сторон (например, дерево, гипсокартон, штукатурка), образующую готовую поверхность стены. Слои обшивки располагаются непосредственно на стене без монтажного зазора (рис. 5).

Изучив основные конструктивные решения технологии CLT, следует рассмотреть ее достоинства и недостатки.

К преимуществам панелей CLT можно отнести:

- высокую заводскую готовность домокомплекта за счет применения модулей;

Табл. 2. Основные технические характеристики панелей МНМ

Показатели	Значения показателей
Влажность панелей	12 % (+/– 2 %)
Паропроницаемость поперек волокон	0,1–0,32 мг/(м·ч·Па)
Шумоизоляция	R = 48 дБ
Теплопроводность	λ = 0,094 Вт/м·К
Водостойкость	μ = 65
Огнестойкость	F90В
Масса изделия	480 кг/м ³

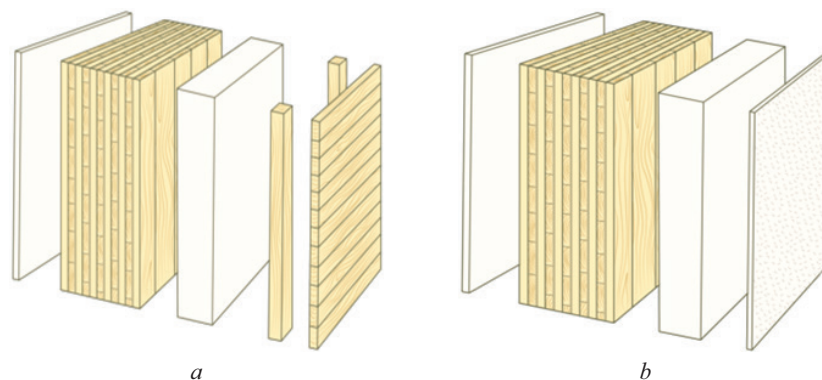


Рис. 4. Примеры отделки наружных панелей: а — вентилируемый фасад; б — штукатурный фасад

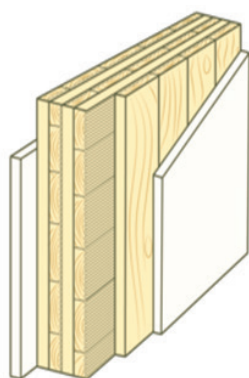


Рис. 5. Примеры отделки панелей перегородок

- скорость выполнения работ по монтажу домокомплекта;
- высокую несущую способность и жесткость панелей за счет перекрестной склейки ламелей;
- высокую сейсмостойчивость зданий и сооружений из CLT-панелей;
- высокую огнестойкость конструкции;
- низкую теплопроводность панелей.

К недостаткам панелей CLT можно отнести:

- большой вес и габариты CLT-панелей, требующих специального транспорта для перевозки и монтажа конструкций;
- уменьшение габаритов панелей приводит к увеличению стыковых соединений, которые являются потенциальными «мостиками холода», а также усложняют монтаж конструкции;
- в связи с низкой стойкостью древесины к воздействию ультрафиолета и других природных факторов, которые могут ее разрушить, необходимо проводить дополнительные защитные мероприятия для сохранения целостности конструкции.

Также рассмотрим основные достоинства и недостатки технологии МНМ.

Преимущества МНМ:

- отсутствие усадки из-за использования доски, обработанной в сушильных камерах до влажности 12–14 %;
- за счет перекрестного соединения ламелей обеспечивается высокая жесткость панелей;

- при производстве панелей используются только натуральные материалы;
- скорость выполнения сборки домокомплекта из-за высокой готовности конструкций;
- сразу после сборки здания можно приступать к отделке благодаря гладким деревянным панелям;
- панели МНМ имеют более низкую стоимость и меньший вес по сравнению с CLT вследствие особенностей производства.

Недостатки МНМ:

- недостаточность исследования данной технологии в России;
- необходимость использования только калиброванных пиломатериалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на высокую схожесть процессов изготовления панелей CLT и МНМ, они имеют одно принципиально важное отличие: панели CLT создаются путем склеивания ламелей в прессах, а панели МНМ собираются с помощью алюминиевых гвоздей. Стоимость панелей CLT выше стоимости панелей МНМ на 30–40 %.

Применение технологии CLT оптимально для возведения многоэтажных зданий, в случаях, когда несущая способность панелей и их высокая заводская готовность используются на 100 %, а высокая себестоимость производства компенсируется большим объемом возводимого строения.

В европейских странах широко используют и технологии МНМ для строительства зданий.

Основным препятствием для массового использования МНМ-панелей в России является нехватка проведенных испытаний таких конструкций с учетом массовости их применения и, как следствие, недостаток полноценной, а главное современной документационной базы, а также отсутствие унификации и стандартизации таких конструкций.

Деревянное многоэтажное строительство из панелей CLT и МНМ — это реальность, поскольку оно соответствует современным нормам энергоэффективного строительства. Сооружения по данным технологиям могут возводиться на территориях со сложными

инженерно-геологическими условиями, в сейсмически активных, горных или вечномёрзлых районах.

Монтаж деревянных конструкций отличается высокой технологичностью и скоростью ввиду того, что используются модули заводской сборки.

Технология строительства деревянных зданий Massiv-Holz-Mauer более оптимальна по технико-экономическим, физическим и эксплуатационным характеристикам для России при условии обширного изучения и проведения испытаний данной технологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Потехин Н.И. Перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесины // Лесной вестник. 2023. Т. 27. № 4. С. 128–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136. EDN OAYORW.
2. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Курдюков А.С. Большепролетные клееные деревянные конструкции и технология их изготовления // Лесной вестник. 2024. Т. 28. № 4. С. 138–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-138-146. EDN JJXSMZ.
3. Афонин В.С. Этапы формирования мирового многоэтажного деревянного строительства // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 2 (43). С. 41–61. EDN ORXTPL.
4. Акишов Э.А. Технологические особенности клеёных деревянных конструкций // Архитектура и современные информационные технологии. 2021. № 1 (54). С. 156–164. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164. EDN KCIRXW.
5. Арзиманов Д.И., Гаевская З.А. Сравнительный анализ энергоэффективности CLT-панелей для жилой многоэтажной застройки Санкт-Петербурга // Инженерные исследования. 2023. № 2 (12). С. 11–18. EDN HGAQIZ.
6. Дружинин А.В. Технология клееных материалов и древесных плит: учебное пособие. Екатеринбург : УГЛТУ, 2005
7. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 329–339. EDN TWGFWN.
8. Чахов Д.К., Докторов И.А., Лавров М.Ф. Теплозащитные свойства деревянных стеновых панелей «Massiv Holz-Mauer» для условий Якутии // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 1. С. 35–38. EDN OOHUVX.
9. Есауленко И.В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. № 4. С. 17–25. DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25. EDN OFUFZP.
10. Горишков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 1 (11). С. 9–13. EDN MZJCQR.
11. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Гречаная Н.Н. Информационно-измерительные системы мониторинга технического состояния строительных конструкций // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 5. С. 86–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-86-93. EDN YOKOYN.
12. Запруднов В.И., Серегин Н.Г. Методы и средства мониторинга технического состояния строительных конструкций // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 5. С. 108–115. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-108-115. EDN ZXRQJL.
13. Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Методика расчета производства клееного оконного бруса для строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2 (101). С. 157–164. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.157-164. EDN YGJDXJ.
14. Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 3. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2. EDN YLXHCD.
15. Seregin N.G. Losses in the manufacture of wooden building structures // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1425. Issue 1. P. 012133. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012133
16. Unaibayev B.Z., Unaibayev B.B., Andreyashenko V. Cast-in-situ piles encasements based on oil-bituminous rocks (kirs) in saline soils // Scientific Review Engineering and Environmental Studies (SREES). 2021. Vol. 30. Issue 1. Pp. 51–61. DOI: 10.22630/pniks.2021.30.1.5
17. Jin X., Wang T.-H., Cheng W.-C., Luo Y., Zhou A. A simple method for settlement evaluation of loess-pile foundation // Canadian Geotechnical Journal. 2019. Vol. 56. Issue 11. Pp. 1690–1699. DOI: 10.1139/cgj-2017-0690
18. Kong G., Cao T., Hao Y., Zhou Y., Ren L. Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay // Underground Space. 2021. Vol. 6. Issue 1. Pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.09.005
19. Fahrurrozi M., Wirawan S.K. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. Vol. 22. Issue 2. Pp. 458–467. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.11.008
20. Zhang Q., Shao M., Jia X., Wei X. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests // Geoderma. 2019. Vol. 338. Pp. 170–177. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.11.051

21. Lu Z., Xian Sh., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil // Cold Regions Science and Technology. 2019. Vol. 157. Pp. 42–52. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.09.009

Поступила в редакцию 8 декабря 2024 г.
Принята в доработанном виде 5 января 2025 г.
Одобрена для публикации 22 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Григорьевич Серегин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SereginNG@mgsu.ru;

Артем Сергеевич Курдюков — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; temik1516@gmail.ru.

Вклад авторов:
Серегин Н.Г. — научное руководство, доработка и редактирование текста.
Курдюков А.С. — сбор и обработка научного материала, написание исходного текста.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Recent European trends show an increase in the application of wooden structures not only in low-rise construction, but also in construction of multi-storey industrial and civil buildings [1, 2]. The construction of multi-storey wooden buildings is challenged by unique geometric and structural characteristics of elements that cannot be made from standard lumber. Research efforts focus on innovative solutions capable of combining strength, aesthetics and energy efficiency of industrial and civil engineering buildings and structures made of wood. To solve this and many other problems, various technologies are developed to advance wooden construction.

Now cross-laminated, or CLT, panels are the most widespread technology employed to solve this problem. However, another technology, or MHM (Massiv-Holz-Mauer) is used along with the CLT technology. The MHM technology has a similar design [3–5].

The mission of this research work is to study the application of CLT and MHM panels in industrial and civil engineering for the construction of multi-storey buildings and structures, to research potential design solutions, and to review technical characteristics of structures.

MATERIALS AND METHODS

CLT (cross laminated timber), also known as KLH, BSP, X-LAM, CROSS-LAM, is a panel manufacturing technology based on the cross-gluing of lamella layers made of coniferous trees (Fig. 1) [6, 7].

This panel manufacturing technology was developed in the late 1980s and first used in Germany and

Austria in the early 1990s. More extensive research into this technology was conducted in the late 1990s [8, 9].

By the year 2000, the production of multilayered laminated wooden panels was popular in European countries. Panels were used to make various structural systems of single- and multi-storey buildings [10, 11].

Oven-dry coniferous wood boards with a humidity of 12 % are used to make CLT panels. They are split into lamellas with pre-set cross-section dimensions. Further, lamellas are spliced along the length. Then lamellas are calibrated and assembled into board panels; this process is accompanied by layered cross-gluing. After that, board panels are pressed into panels, calibrated, grinded and cut by CNC machines [12].

These operations are necessary to manufacture panels with pre-set geometric parameters, apertures and openings. Cross-lamination gluing ensures the production of panels with excellent physical, mechanical and thermal insulation properties, unlike traditional wood.



Fig. 1. Cross-gluing of CLT panels

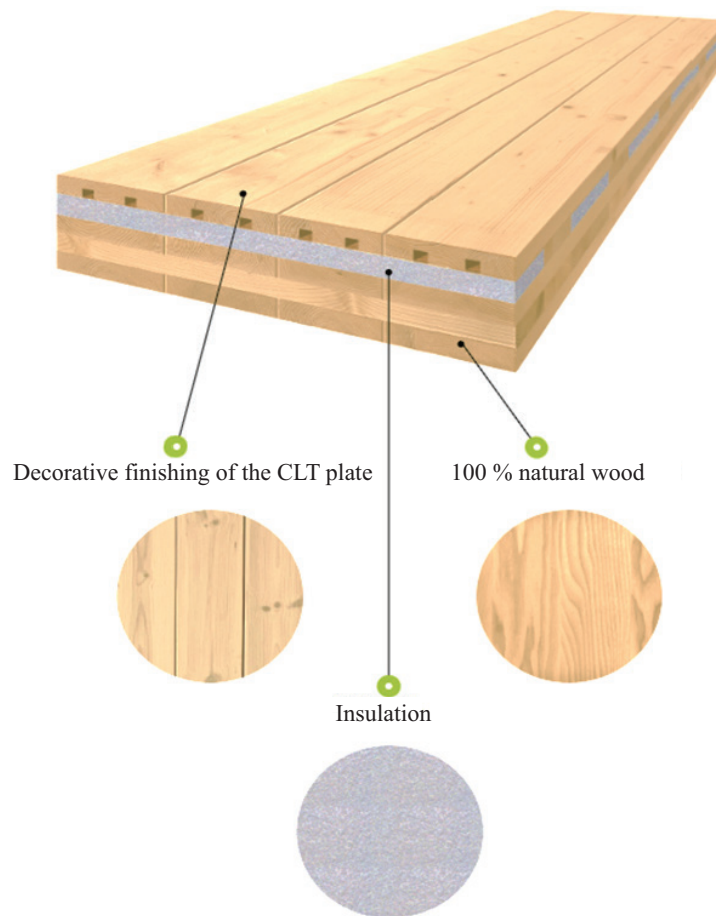


Fig. 2. Composition of GrO Thermo plates

Overall dimensions of CLT panels vary in the following range: width — up to 4 m, length — 24 m, and thickness — from 0.06 to 0.4 m [13].

It was mentioned earlier that modern construction science keeps searching for innovative solutions. Hence, along with standard CLT panels, insulated GrO Thermo plates were developed for exterior walls.

GrO Thermo is an insulated CLT plate; part of its inner lamellae is replaced by the insulant made of wood. The insulation layer is glued and pressed into the plate in the same way as lamellas [14].

The panel insulant has 94 % of wood, eco-friendly glue and paraffin, added to maintain the plate shape (Fig. 2).

Principal technical characteristics of CLT panels are provided in Table 1 [15].

The most famous buildings and structures made of CLT panels are [16]:

- a 100-meter Rocket&Tigerli tower in Switzerland; its construction should be completed in 2026, according to the construction schedule;
- Mjostarnet facility in Norway; it is 85.4 m high and has 18–20 floors;
- Sokoliki residential facility in Sokol, Russia; it is a four-storey building; it is 15 m high, and its floor area is 3,013 m².

Now let's consider the MHM (Massiv-Holz-Mauer or multi-layered solid coniferous wood) technology. These panels are made layer-by-layer with an overlap of edged coniferous boards that are 20–24 mm thick (Fig. 3) [17].

MHM panels were developed by Hans Hundegger. In 2001, he launched their production from non-merchantable wood, grades 3–4. As early as in September 2002, the first house was built from MHM panels.

In 2003–2019, about 300 facilities were built from wooden plates in Germany. This technology became a mainstream for the construction of low-rise and high-rise buildings in Europe.

The MHM technology arrived in Russia in 2007, but due to the lack of awareness, it failed to gain as much popularity as CLT, which is also true for the pre-sent time [18].

Oven-dry boards with a moisture content of 12 % are used to make MHM wall panels. They do not require any preservative treatment or impregnation.

Each board is processed by a four-sided Hundegger machine to cut grooves, which, make a layer of air for reliable sound insulation and thermal conductivity when boards are spliced. Side profiles are also cut by this machine to connect boards and to prevent thermal bypasses. Then, layer-by-layer, boards are cross-assembled into board panels, which are spliced by aluminum nails. Board panels have pre-set dimensions.

Table 1. Principal technical characteristics of CLT panels

Characteristics	Values
Moisture content	12 % (+/-2 %)
Vapor permeability across fibers	0.05 mg/(m·h·Pa)
Sound insulation	R > 60 dB
Strength class	C24 (All-Russian State Standard 33080–2014)
Thermal conductivity	$\lambda = 0.13 \text{ Wt/m}\cdot\text{K}$ (EN 12524)
Heat capacity	$c = 1.6 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ (EN 12524)
Water resistance	$\mu = 20\text{--}50$ (EN 12524)
Compressive strength along fibers	13–15 N/mm ²
Compressive strength across fibers	1.8 N/mm ²
Flexural strength	10 N/mm ²
Design wall load	60 kN/m ²
Design floor load	5 kN/m ²
Fire stability	D-s2, d0 (2003/43/EC)
Fire resistance	REI 60–120 (EN 1995-1-2–2004)
Charring rate	0.65 mm/min (EN 1995-1-2)
Product weight	470–480 kg/m ³



Fig. 3. The cross section of an MHM panel

Aluminum nails (pins) are chosen to reduce damage to and wear and tear of cutting tools during mechanical tooling.

Further, pre-set geometric dimensions, apertures and openings needed for heating, sewage and electricity pipes are entered into the CNC software program to have the panel duly cut.

The manufacturing technology ensures environment-friendly panels that have neither glue, nor any other chemical impregnation agents.

The production line is designed to make panels with the following dimensions: height — 3.25 m; length — up

to 6 m; thickness of external wall panels — from 340 (15 layers) to 160 mm (7 layers), and thickness of interior wall panels — 160 or 115 mm [19].

Principal technical characteristics of MHM panels are provided in Table 2 [20].

The most famous buildings and structures made of MHM panels are [21]:

- SporX building in Norway; it is a 40-meter office building; 2,000 m³ of solid wood and 500 m³ of laminated timber were used to construct this facility;
- Waldeck Spa Kur Hotel in Bad Dürkheim.

RESULTS

MHM panels and CLT panels have common technical features related to the mandatory use of finishing materials after the installation of construction facilities:

- interior decoration (wood, gypsum cardboard, plaster) is mounted directly on panels;
- exterior finish is part of the façade; the finish calculation is based on the pre-set heat transfer value which is part of the building’s envelope structure. This finish can be combined with ventilated (Fig. 4, a) and plaster facades (Fig. 4, b);
- both sides of partitions have cladding (for example, wood, gypsum cardboard, plaster) that serves as the surface of a finished wall. Cladding layers are attached directly to the wall without any installation clearance (Fig. 5).

Table 2. Principal technical characteristics of CLT panels

Characteristics	Values
Moisture content	12 % (+/-2 %)
Vapor permeability across fibers	0.1–0.32 mg/(m·h·Pa)
Sound insulation	R = 48 dB
Thermal conductivity	$\lambda = 0.094 \text{ Wt/m}\cdot\text{K}$
Water resistance	$\mu = 65$
Fire resistance	F90B
Product weight	480 kg/m ³

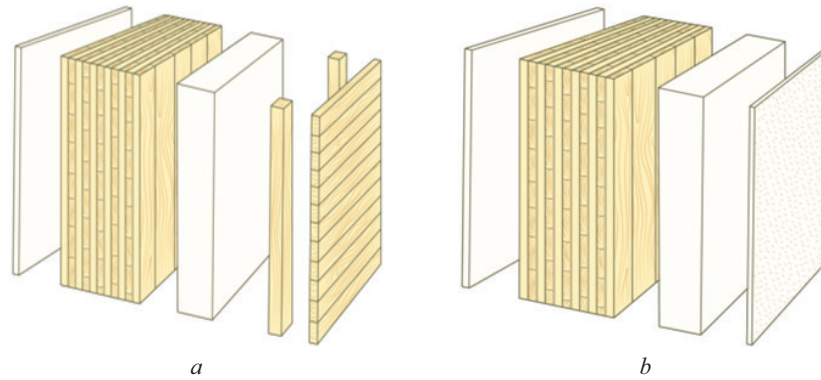


Fig. 4. Exterior panel finishes: *a* — ventilated facade; *b* — plastered facade

A study on the main design solutions for the CLT technology should be followed by the analysis of its strengths and weaknesses.

CLT panels have the following strengths:

- high level of prefabrication due to the modular structure;
- fast installation of prefabricated houses;
- high load-bearing capacity and stiffness of panels, due to cross-lamination gluing of lamellas;
- high earthquake resistance of buildings and structures made of CLT panels;
- high fire resistance;
- low thermal conductivity of panels.

CLT panels have the following weaknesses:

- large weight and dimensions require specialized vehicles for transportation and installation;
- smaller-size panels end in larger butt joints, which are potential thermal bypasses; they also make installation more complicated;
- low resistance of wood to UV radiation and other natural factors can damage panel structures; supplementary protection will maintain structural integrity.

Let's consider the main strengths and weaknesses of the MHM technology.

The MHM technology has the following strengths:

- no shrinkage which is prevented by oven-dry boards with a moisture content of 12–14 %;
- high panel stiffness due to the crossover connection of lamellas;
- only natural materials are used to make panels;
- fast assembly of prefab houses due to high prefabrication level;
- finishing work can be initiated immediately after the house assembly because wooden panels are smooth;
- MHM panels are cheaper and lighter than CLT panels.

The MHM technology has the following weaknesses:

- this technology is understudied in Russia;
- only calibrated lumber is applicable.

CONCLUSIONS

Although processes of manufacturing of CLT and MHM panels are similar, they have one fundamentally important difference: CLT panels are made by gluing

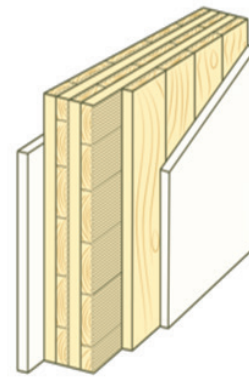


Fig. 5. Partition panel finishing options

lamellas in press machines, while MHM panels are assembled using aluminum nails. The cost of CLT panels is higher than the cost of MHM panels by 30–40 %.

The CLT technology is optimal for multi-storey buildings, where high bearing capacity and prefabrication of panels are 100 % necessary, and high manufacturing costs are compensated by the large size of a construction facility.

In European countries, MHM technologies are widespread in building construction.

The main obstacle, preventing the dissemination of MHM panels in Russia, is the fact that no tests were conducted to examine these structures and to authorize their widespread use, and as a result, there is no complete and, most importantly, advanced set of documents. Besides, such structures were not subjected to unification and standardization.

Multi — storey wooden structures made of CLT and MHM panels is a reality, because they meet advanced standards of energy-efficient construction. These technologies can be applied in areas featuring problematic engineering and geological conditions, in earthquake prone, mountainous or permafrost areas.

The installation of wooden structures is fast and efficient, because prefab modules are used.

For Russia, the Massiv-Holz-Mauer technology is more optimal in terms of technical, economic, physical and operational characteristics, given that extensive research and testing are conducted.

REFERENCES

1. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Potekhin N.I. Prospects for unique buildings construction and wood structures. *Forestry Bulletin*. 2023; 27(4):128-136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136. EDN OAYORW. (rus.).
2. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Kurdyukov A.S. Large-span glued wooden structures and their manufacturing technology. *Forestry Bulletin*. 2024; 28(4):138-146. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-138-146. EDN JJXSMZ. (rus.).
3. Afonin V.S. Periods in the formation of world multi-storey timber construction. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 2(43):41-61. EDN ORXTPL. (rus.).
4. Akshov E. Technological features of glued wooden structures. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021; 1(54):156-164. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164. EDN KCIRXW. (rus.).
5. Arzimanov D., Gaevskaya Z. Comparative energy efficiency analysis of CLT-panels for residential high-rise buildings in St. Petersburg. *Engineering Research*. 2023; 2(12):11-18. EDN HGAQIZ. (rus.).
6. Druzhinin A.V. *Technology of glued materials and wood plates : textbook*. Yekaterinburg, UGLTU, 2005. (rus.).
7. Rogozhina A.V. Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering journal of Don*. 2022; 6(90):329-339. EDN TWGFWN. (rus.).
8. Chakhov D.K., Doktorov I.A., Lavrov M.F. Heat-insulating properties of wooden wall panels “Massiv-Holz-Mauer (MHM)” for conditions of Yakutia. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 1:35-38. EDN OOHUVX. (rus.).
9. Esaulenko I.V. Prospects for the development of high-rise wooden housing construction in Russia on foreign experience. *Architecture, Construction, Transport*. 2021; 4:17-25. DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25. EDN OFUFZP. (rus.).
10. Gorshkov A.S. Energy Efficiency in Construction: Issues of Standardization and Measures to Reduce Energy Consumption of Buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2010; 1(11):9-13. EDN MZJCQP. (rus.).
11. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Grechanaya N.N. Information-measuring systems of technical condition of construction structures monitoring. *Forestry Bulletin*. 2018; 22(5):86-93. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-86-93. EDN YOKOYH. (rus.).
12. Zaprudnov V.I., Seregin N.G. Methods and means of monitoring building structures technical condition. *Forestry Bulletin*. 2019; 23(5):108-115. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-108-115. EDN ZXRQJL. (rus.).
13. Seryogin N.G., Giyasov B.I. Procedure of Calculation of Production of Window Glued Laminated Lumber for Building Structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(2):(101):157-164. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.157-164. EDN YGJDXJ. (rus.).
14. Seregin N.G., Giyasov B.I. Measuring system for diagnostic operation and monitoring of technical condition of unique buildings and structures. *Construction: Science and Education*. 2017; 7(3):(24):3. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2. EDN YLXHCD. (rus.).
15. Seregin N.G. Losses in the manufacture of wooden building structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425(1):012133. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012133
16. Unabayev B.Z., Unabayev B.B., Andreyashenko V. Cast-in-situ piles encasements based on oil-bituminous rocks (kirs) in saline soils. *Scientific Review Engineering and Environmental Studies (SREES)*. 2021; 30(1):51-61. DOI: 10.22630/pniks.2021.30.1.5
17. Jin X., Wang T.-H., Cheng W.-C., Luo Y., Zhou A. A simple method for settlement evaluation of loess–pile foundation. *Canadian Geotechnical Journal*. 2019; 56(11):1690-1699. DOI: 10.1139/cgj-2017-0690
18. Kong G., Cao T., Hao Y., Zhou Y., Ren L. Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay. *Underground Space*. 2021; 6(1):76-84. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.09.005
19. Fahrurrozi M., Wirawan S.K. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2019; 22(2):458-467. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.11.008
20. Zhang Q., Shao M., Jia X., Wei X. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semihumid forests. *Geoderma*. 2019; 338:170-177. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.11.051
21. Lu Z., Xian Sh., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2019; 157:42-52. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.09.009

Received December 8, 2024.

Adopted in revised form on January 5, 2025.

Approved for publication on January 22, 2025.

B I O N O T E S: **Nikolay G. Seregin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SereginNG@mgsu.ru;

Artyom S. Kurdyukov — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; temik1516@gmail.ru.

Contribution of the authors:

Nikolay G. Seregin — scientific guidance, revision and editing of the text.

Artyom S. Kurdyukov — collection and processing of scientific material, writing the source text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Проектирование стальных решетчатых конструкций линий электропередачи с использованием параметров надежности на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9

Анатолий Николаевич Оржеховский¹, Антон Владимирович Танасогло²,
Игорь Михайлович Гаранжа², Владимир Филиппович Муцанов¹,
Наталья Сергеевна Смирнова¹

¹ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА);
г. Макеевка, ДНР, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение надежности решетчатых конструкций опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) является первоочередной задачей проектировщика. Если расчет и проектирование типовых конструкций массового строительства ведется в соответствии с действующими нормативными документами, то вопрос обеспечения гарантируемого минимально требуемого уровня надежности опор ВЛ осуществляется с применением различного рода коэффициентов надежности. По сути, остаются FORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций первого порядка), так как SORM-методы (методы второго порядка) крайне сложны в реализации. При этом однозначный алгоритм определения характеристик надежности конструкций опор ВЛ действующие нормативные документы не дают.

Материалы и методы. Предлагается методика определения склонности стальных конструкций линий электропередачи к лавинообразному обрушению на базе численного обоснованного установления исключаемых элементов системы для формирования вторичной расчетной схемы. В основе лежит расчет на базе метода конечных элементов (МКЭ) в геометрически и конструктивно-нелинейной постановке. Данная методика позволяет четко выявить наиболее ответственные стержни конструкции, а не назначать их на основе инженерного опыта или рекомендаций.

Результаты. Приводится методика определения численных характеристик надежности стальных конструкций линий электропередачи на базе МКЭ в стохастической постановке. В качестве ключевой характеристики выступает дальность отказа β . Искомая надежность системы находится между нижним значением β_{\min} (характеристика одного наиболее ответственного элемента системы) и верхним значением β_{\max} (характеристика для группы наиболее ответственных элементов системы), установленных при анализе конструкции на склонность к лавинообразному обрушению. С целью апробации предложенных методик выполнен анализ надежности анкерно-угловой опоры У220-2+9. По результатам расчетов выявлена недостаточная надежность конструкции для расчетной ситуации с максимальными из рассматриваемых нагрузок.

Выводы. Разработана методика анализа склонности стальных стержневых конструкций опор линий электропередачи к лавинообразному обрушению, позволяющая определять наиболее опасные элементы системы для конкретно заданного вида нагружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушная линия электропередачи, надежность, башенная решетчатая опора, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель, численные исследования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Оржеховский А.Н., Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Муцанов В.Ф., Смирнова Н.С. Проектирование стальных решетчатых конструкций линий электропередачи с использованием параметров надежности на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9 // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.5

Автор, ответственный за переписку: Игорь Михайлович Гаранжа, garigo@mail.ru.

Design of steel lattice structures of power transmission lines using reliability parameters on the example of anchor-angle support U220-2+9

Anatoliy N. Orzhehovskiy¹, Anton V. Tanasoglo², Igor M. Garanzha²,
Vladimir F. Mushchanov¹, Natalia S. Smirnova¹

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; Makeevka, DPR, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the reliability of lattice structures of overhead line (OL) supports is the primary task of the designer. If the calculation and design of typical structures of mass construction is carried out in accordance with the current regulatory documents, then the issue of ensuring the guaranteed minimum required level of reliability of OL supports is carried out by using various types of reliability factors. In fact, FORM methods (first-order methods for determining the reliability of building structures) remain, since SORM methods (second-order methods) are extremely difficult to implement. At the same time, current regulatory documents do not provide an unambiguous algorithm for determining the reliability characteristics of OL support structures.

Materials and methods. The paper proposes a method for determining the susceptibility of steel structures of power transmission lines to avalanche-like collapse based on a numerically reasonable determination of the excluded elements of the system for forming a secondary calculation scheme. It is based on the calculation based on the finite element method in a geometrically and structurally nonlinear formulation. This method allows for a clear determination of the most critical structural rods, rather than assigning them based on engineering experience or recommendations.

Results. A method for determining the numerical reliability characteristics of steel structures of power transmission lines is proposed based on the finite element method in a stochastic formulation. The failure range β serves as the main characteristic. The sought reliability of the system is between the lower value of β_{\min} (the characteristic of one of the most critical elements of the system) and the upper value of β_{\max} (the characteristic for a group of the most critical elements of the system), determined during the analysis of the structure for the tendency to avalanche-like collapse. In order to test the proposed methods, the reliability of the anchor-angle support U220-2+9 was analysed. Based on the calculation results, insufficient reliability of the structure for the design situation with the maximum of the considered loads was revealed.

Conclusions. A technique was developed for analyzing the tendency of steel rod structures of power transmission line supports to avalanche-like collapse, which makes it possible to determine the most dangerous elements of the system for a specific type of loading.

KEYWORDS: overhead power line, reliability, tower lattice support, stress-strain state, calculation model, numerical studies

FOR CITATION: Orzhehovskiy A.N., Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Mushchanov V.F., Smirnova N.S. Design of steel lattice structures of power transmission lines using reliability parameters on the example of anchor-angle support U220-2+9. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.5

Corresponding author: Igor M. Garanzha, garigo@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности строительных конструкций является первоочередной задачей проектировщика [1, 2]. Если расчет и проектирование типовых конструкций массового строительства ведется в соответствии с действующими нормативными документами, такими как СП, ГОСТ и т.д., то вопрос обеспечения гарантируемого минимально требуемого уровня надежности осуществляется с помощью различного рода коэффициентов надежности [3, 4].

В случае с нетиповыми конструкциями или конструкциями, имеющими повышенный уровень ответственности, разрушение которых может привести к значительным экономическим последствиям или человеческим жертвам, целесообразным становится применение вероятностно-статистических методов обоснования реальных физико-механических характеристик материалов [5]. Тогда обеспечение

требуемого уровня надежности системы определяется путем приведения численных характеристик надежности к минимально требуемым нормативными величинами, которые представлены в ГОСТ Р ИСО 2394–2016 «Конструкции строительные. Основные принципы надежности».

В качестве численных характеристик надежности используются характеристика безопасности β и вероятность отказа P_f [6]. Их определение — непростая задача для инженера. ГОСТ Р ИСО 2394–2016 дает ряд способов вычисления вероятности отказа:

- точными аналитическими методами;
- методами численного интегрирования;
- приближенными аналитическими методами (FORM/SORM методами моментов);
- методами моделирования или сочетанием этих методов.

Для сложных много раз статически неопределимых систем применение точных аналитических

методов и методов численного интегрирования практически неосуществимо. Так как невозможно установить целевую функцию надежности. Методы моделирования требуют значительных затрат времени и ресурсов, переводя инженерную задачу практически в область научных исследований. По сути, остаются FORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций первого порядка), так как SORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций второго порядка, использующие случайные процессы в описании стохастических величин) крайне сложны в реализации [7]. При этом однозначный алгоритм определения характеристик надежности конструкции действующие нормативные документы не дают, ограничиваясь общими рекомендациями и описаниями предлагаемых методов.

Делая вывод, можно отметить, что современному инженеру необходима четкая и однозначная методика определения характеристик надежности, позволяющая обоснованно обеспечивать заданный уровень надежности всех элементов строительной конструкции. Особенно остро этот вопрос стоит при работе с конструкциями повышенного уровня ответственности класса КС-3.

Цель исследования — разработка методики анализа склонности стержневых конструкций опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) к лавинообразному обрушению.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана методика вычисления характеристик надежности стальных стержневых опор линий электропередачи на основе использования дальности отказа;
- выполнен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) решетчатых башенных опор с целью обеспечения рекомендуемого уровня надежности для обоснованного количества конкретных стержней, что позволило сократить металлоемкость опор при обеспечении рекомендуемого уровня надежности на этапе проектирования;
- произведена апробация разработанной методики на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы.

Предмет исследования — численные показатели надежности элементов конструкций решетчатых башенных опор ВЛ.

В качестве объекта исследования приняты конструкции стальных двухцепных решетчатых башенных анкерно-угловых опор ВЛ 220 кВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Высоковольтные линии электропередачи — это сложные составные системы, снабжающие электроэнергией потребителей разной мощности. В зависимости от уровня последствий при разрушении или выходе из строя ВЛ конструкции опор могут от-

носиться к классам КС-3 или КС-2, в соответствии с градацией, используемой в ГОСТ 27751–2014.

Из анализа публикаций, посвященных обеспечению прочности и надежности технического состояния конструкций стальных опор ВЛ, следует, что значительный вклад в изучение данного вопроса внесли: Е.В. Горохов, Е.В. Шевченко, В.Н. Васылев, В.И. Золотарев, Н.А. Сенькин [8, 9], И.П. Смирнов, А.В. Козлов, Н.А. Семенов, а также J. Smith, A. Johnson, K. Müller, M. Garcia, H. Tanaka, L. Wei, E. Johnson, J. Martinez и др. В работах этих авторов серьезное внимание уделяется вопросам мониторинга технического состояния и изучению НДС конструкций. Разработаны конструктивные подходы усиления элементов и узловых соединений.

Некоторые из вышеприведенных авторов рассматривают вопросы каскадного обрушения ВЛ в масштабе всей линии, но не затрагивают область лавинообразного обрушения конкретной опоры [10, 11]. При этом обеспечение отсутствия склонности к лавинообразному обрушению конструкции опоры указано в нормативных документах. Особенно этот критерий важен для анкерных, угловых и концевых опор. Вопросом обеспечения устойчивости к прогрессирующему обрушению занимается не так много авторов. Следует отметить ряд зарубежных исследователей [12, 13], а также соотечественников [14, 15]. Но во всех этих работах анализ ведется с помощью таких программных комплексов, как ЛИРА или ее аналоги. Следовательно, все вышеописанные спорные вопросы не затрагиваются.

Надежность рассматривается как состояние конструкции без дефектов и повреждений. Если таковые имеются, то они подлежат устранению (усиление элементов или узлов конструкции). После этого опора считается удовлетворяющей требованиям надежности. Численные характеристики надежности не устанавливаются и уровень надежности конструкции не анализируется. В свою очередь, нормативные документы определяют надежность как способность конструкции выполнять свои функции в течение расчетного (предусмотренного) срока эксплуатации. Соответственно, становится вопрос об эффективности, а также обоснованности применения конструктивного решения используемого усиления.

Надежность конструкции ВЛ напрямую связана со способностью противостоять прогрессирующему обрушению системы. В СП 385.1325800.2018 даны рекомендации по выбору исключаемого элемента рамных конструкций для формирования вторичной расчетной схемы. Вторичная расчетная схема используется для выполнения анализа склонности конструкции к прогрессирующему обрушению. Стоит подчеркнуть отсутствие четкого понятного регламентированного алгоритма выбора исключаемого элемента опоры при анализе склонности конструкции к прогрессирующему обрушению. Это создает неопределенность в подходе к расчету. Также в некото-

рых случаях вызывает настороженность применение коэффициента динамичности, равного двум при исключении элемента из первичной расчетной схемы. В конструкциях, выполненных из малоуглеродистой стали, мгновенное (хрупкое) разрушение элемента маловероятно. Следовательно, требуется четкий и понятный инженеру алгоритм выбора наиболее ответственных элементов конструкций ВЛ, разрушение которых неминуемо повлечет за собой развитие прогрессирующего обрушения.

Нормы проектирования, основанные на теории надежности, ставят своей целью достижение определенной вероятности того, что разрабатываемая конструкция будет пригодной для использования в течение конкретного периода, учитывая ее расчетный срок службы:

$$P_{fail}(T_i) \leq [P_{fail}], \quad (1)$$

где $[P_{fail}]$ — предписанное значение вероятности отказа.

Из анализа неравенств становится ясно, что основными задачами норм проектирования является обоснование обеих частей неравенства — и правой, и левой.

Для доказательства правой стороны неравенства, т.е. для определения необходимого уровня надежности, требуется выполнить задачу вероятностно-оптимального проектирования, при этом важно учитывать не только экономические факторы, но и социальные критерии.

В упрощенном виде $[P_{fail}]$ для случая установления вероятности отказа конструкции, вызванного любой причиной в течение ее расчетного срока службы $[P_{fail}]''$, предложено определять как:

$$[P_{fail}]'' = \frac{10^{-4} \zeta_s T}{L}, \quad (2)$$

где ζ_s — коэффициент социальной значимости; T — расчетный срок службы конструкции; L — среднее число людей, находящихся внутри сооружения или в непосредственной близости от него в течение периода, за который оценивается риск.

Учитывая, что в силу наличия случайных ошибок, дефектов, несовершенств, которые могут иметь место при проектировании, монтаже и эксплуатации сооружения, в очень упрощенной форме предлагается связать теоретическую и действительную вероятность отказа соотношением $[P_{fail}] = 0,1[P_{fail}]''$.

Тогда требуемое значение теоретической вероятности отказа примет вид:

$$[P_{fail}] = \frac{10^{-5} \zeta_s T}{L}. \quad (3)$$

Для вычисления значений $P_{fail}(T_i)$ используются упрощенные подходы:

- *методы 1-го уровня*, для которых приемлемое значение надежности обеспечивается некоторым количеством частных коэффициентов надежности,

вводимых к характеристическим (нормативным) значениям исходных величин;

- *методы 2-го уровня*, для которых надежность проверяется только в точке на границе области отказа, а неравенство проверяется сравнением индекса надежности.

На основе методов 1-го уровня в работе предложен алгоритм расчета численных показателей надежности в виде характеристики безопасности β . Алгоритм реализован на языке программирования MATLAB и состоит из двух основных расчетных блоков. В первом определяется группа наиболее ответственных элементов, разрушение которых критично для всей системы и неминуемо повлечет начало лавинообразного обрушения. С этой целью выполняется геометрически и конструктивно нелинейный расчет, где в рамках одного вида нагрузки производится пошаговое нагружение системы дополнительной нагрузкой и фиксируются элементы, вылетевшие из работы. Стержни, переставшие удовлетворять условиям прочности, фиксируются по мере увеличения дополнительной нагрузки и передаются во второй расчетный блок.

Группа элементов, вышедших из работы первой очередью (иногда принимается во внимание и вторая очередь, это зависит от желаемой точности анализа системы и количества элементов), считается наиболее ответственной и передается во второй расчетный блок.

Во втором расчетном блоке для группы наиболее ответственных элементов вычисляются численные характеристики надежности. В качестве основной выступает дальность отказа или характеристика безопасности. В качестве стохастических величин рассматриваются геометрические характеристики плоских сечений элементов, прочностные характеристики материала (предел текучести материала), ветровая нагрузка, снеговая нагрузка, геометрические параметры конструкции в виде отклонения координат узлов. Расчет характеристики безопасности осуществляется на основе метода конечных элементов (МКЭ) в вероятностной постановке.

Используя генератор случайных чисел, в рамках заранее определенных законов распределения, генерируются случайные величины. На основе метода Монте-Карло проводится вычисление характеристик безопасности группы наиболее ответственных элементов.

Результатом расчетов в рамках второго расчетного блока выступают две величины:

- β_{min} — минимальное значение характеристики безопасности из группы наиболее ответственных элементов системы;
- β_{max} — характеристики безопасности группы наиболее ответственных элементов системы, работающих параллельно.

Эти две величины и будут определять верхний и нижний пределы надежности конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенная методика анализа склонности системы к лавинообразному обрушению, а также вычислению численных показателей надежности конструкции апробировалась на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы.

Рассматривались расчетные ситуации для режима работы конструкции Шк:

- 1) опора концевая;
- 2) оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору;
- 3) трос не оборван.

Материал конструкций — углеродистые стали для сварных конструкций ВСт3 по ГОСТ 380–71*, соответствующие С245. Элементы секций соединяются болтами нормальной точности классом 5.6. Пояса смежных секций соединены между собой фланцами на болтах класса 5.6.

Пояса первых трех снизу секций опоры выполнены из уголка 200×16 мм, затем сечение пояса

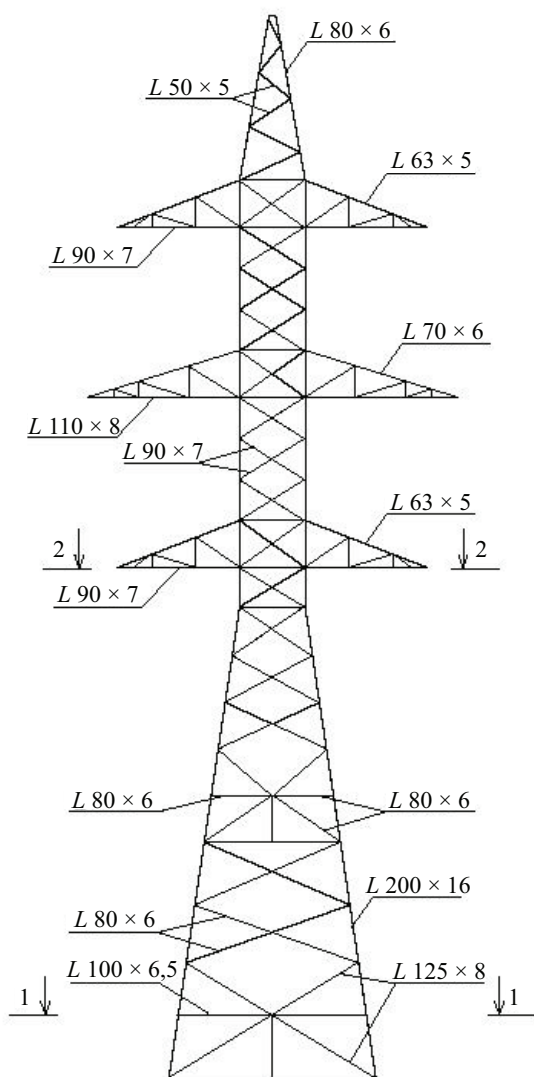


Рис. 1. Сечения основных элементов опоры У220-2+9

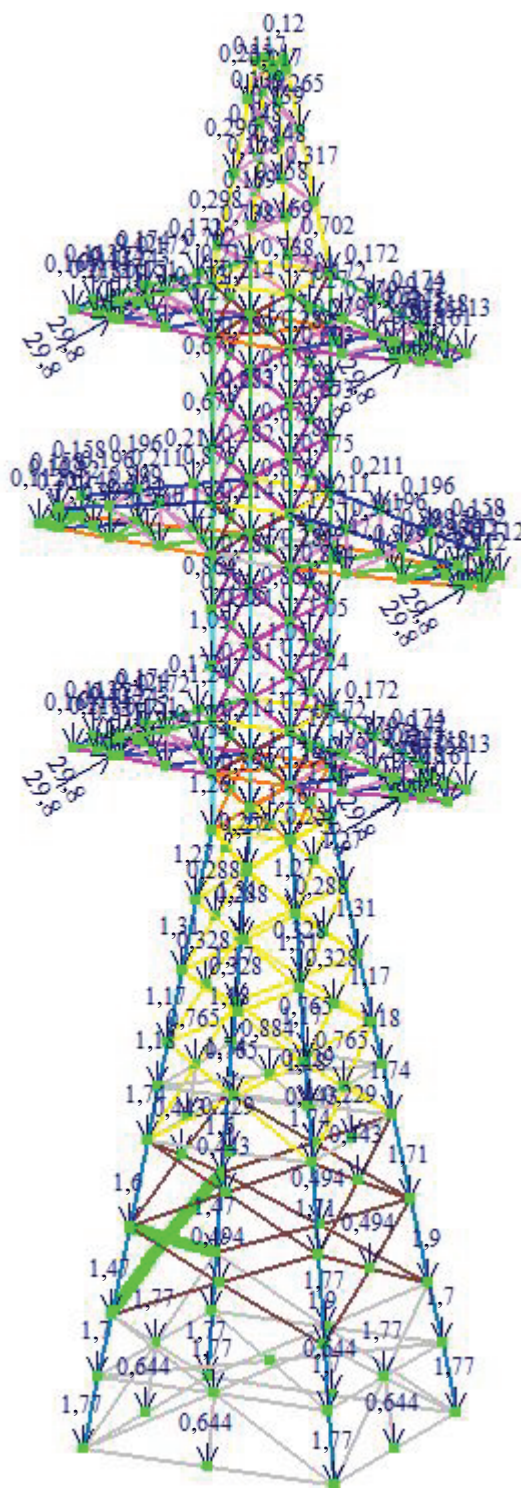


Рис. 2. Расчетная схема концевой опоры У220-2+9 для выполнения поверочных расчетов в ПК ЛИРА-САПР (первая расчетная ситуация)

изменяется на уголки (верхняя секция) 160×10 мм (рис. 1). Пояса тросостойки — уголок 80×6 мм. Сечения раскосов в пределах одной секции одинаковые: раскосы подставки выполнены из уголка 125×8 мм, раскосы первых двух снизу секций изготовлены из уголка 80×6 мм, раскосы верхних секций — уголок 90×7 мм, раскосы тросостойки —

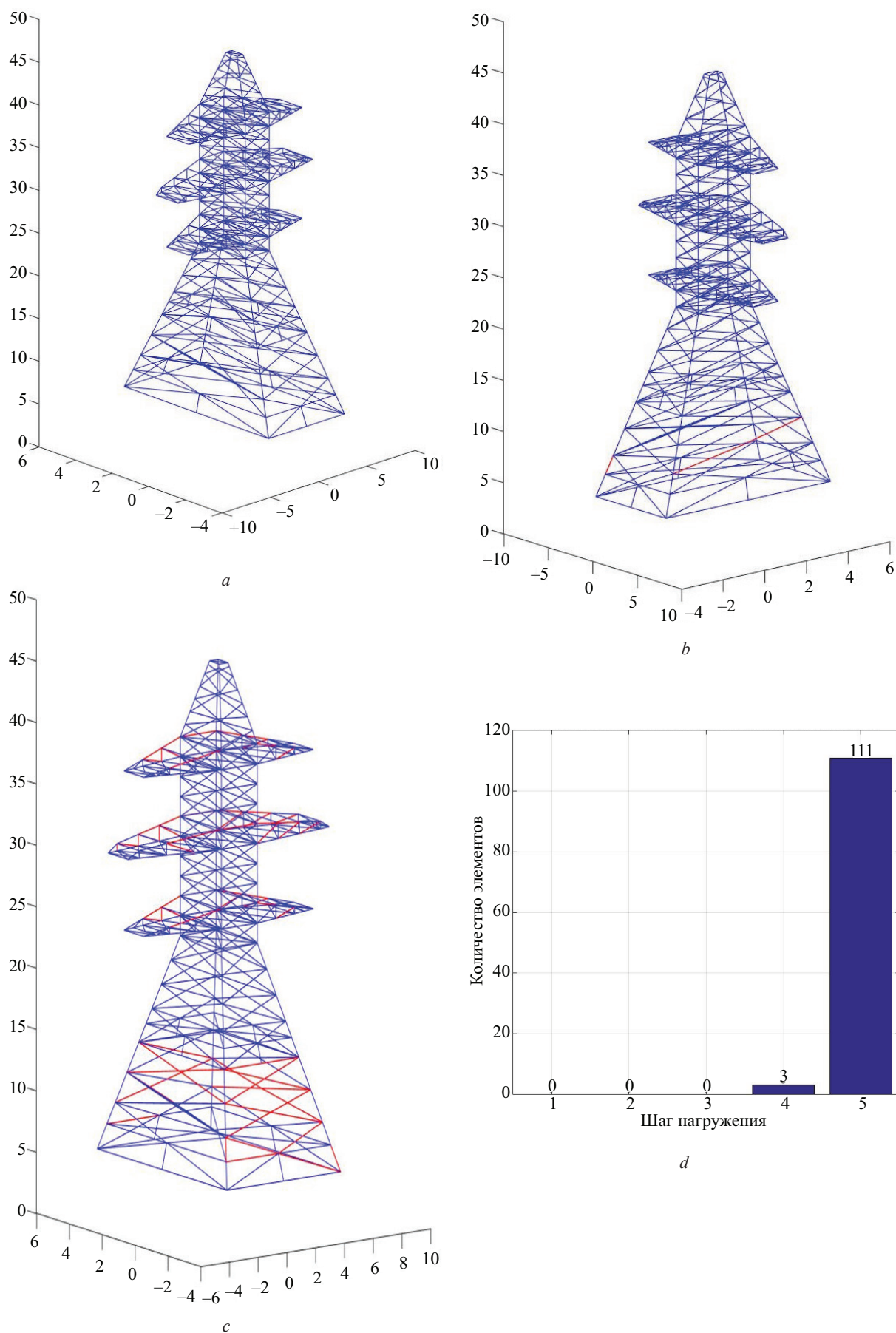


Рис. 3. Расчет опоры У220-2+9 (расчетная ситуация 2): *a* — исходная расчетная схема в MATLAB; *b* — 4-й шаг загрузки, элементы, вышедшие из работы (3 шт.); *c* — 5-й шаг загрузки, элементы, вышедшие из работы (111 шт.); *d* — график выхода элементов при загрузении конструкции временной нагрузкой

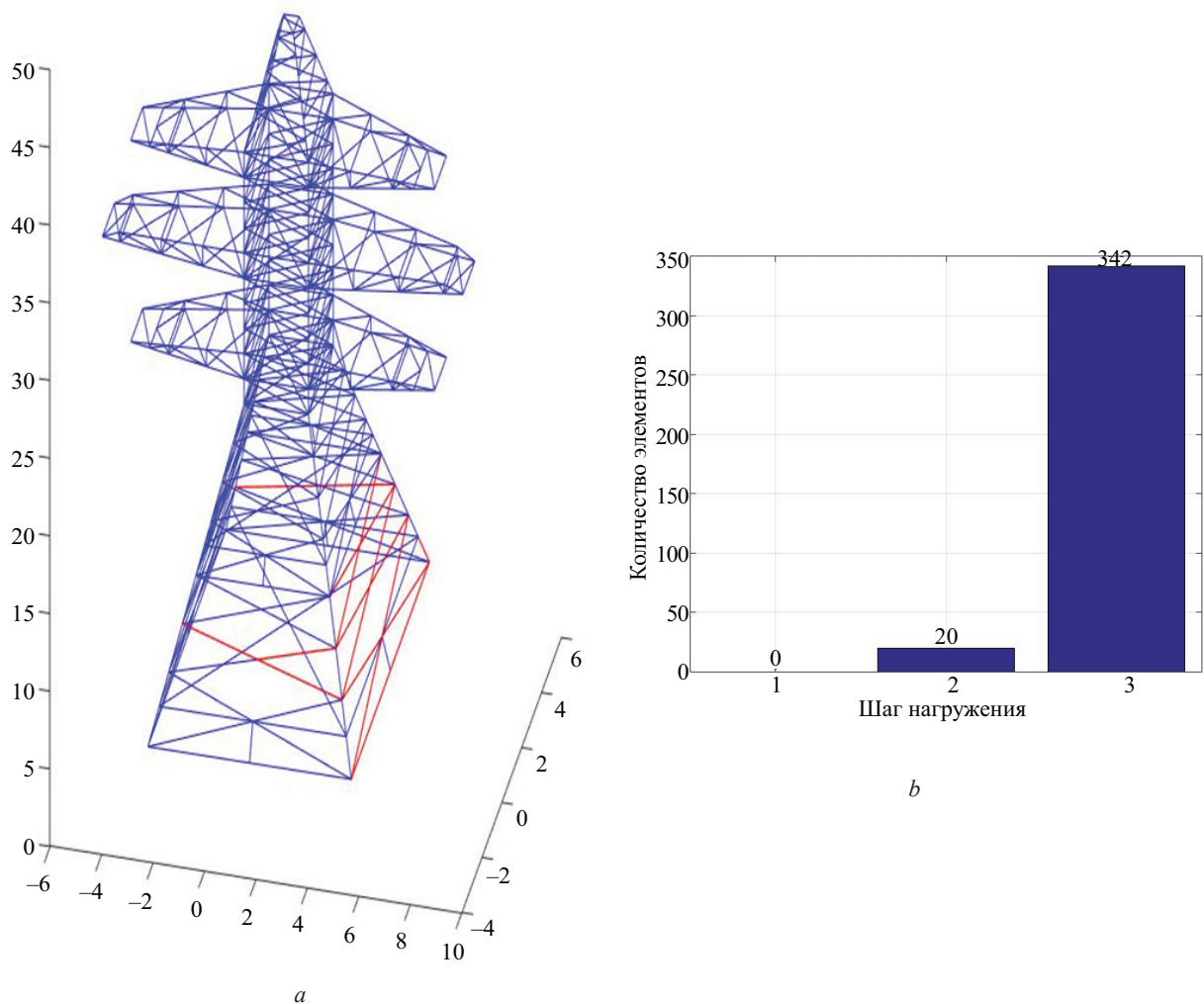


Рис. 4. Расчет опоры У220-2+9 (расчетная ситуация 3): *a* — 4-й шаг нагружения, элементы, вышедшие из работы (20 шт.); *b* — график выхода элементов при нагружении конструкции временной нагрузкой

50 × 5 мм. Пояса нижних и верхних траверс — уголок 90 × 7 мм, средней траверсы — уголок 110 × 8 мм. Тяги нижних и верхних траверс — уголок 63 × 5 мм, средней траверсы — 70 × 6 мм. Диафрагмы: нижних секций — уголок 100 × 6,5 мм, в местах примыкания траверс — уголок 110 × 8 мм.

В качестве случайных величин рассматривается собственный вес конструкции, гололедная нагрузка [16], дефекты геометрии конструкции [17] и прочностные свойства материала (предел текучести или условный предел текучести).

Расчетная схема опоры (работающей как консольная), созданная в ПК ЛИРА-САПР для проведения поверочных расчетов, приведена на рис. 2. Графические данные по первой и второй расчетным ситуациям схожи между собой и для второй расчетной ситуации показаны на рис. 3. Информация по третьей расчетной ситуации представлена на рис. 4.

Результаты численного эксперимента приведены в табл. 1.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что при максимальных нагрузках на опору

Табл. 1. Результаты численного определения надежности опоры У220-2+9

Номер расчетной ситуации	Количество наиболее ответственных элементов	Количество шагов нагружения	β_{\min}	β_{\max}	ГОСТ Р ИСО 2394–2016 β
1	3	4	9,32	13,95	4,7
2	3	4	6,00	15,17	
3	20	2	3,21	9,08	

Табл. 2. Подбор сечения элементов опоры У220-2+9 с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО 2394–2016

Номер расчетной ситуации	Количество наиболее ответственных элементов	Количество шагов нагружения	β_{\min}	β_{\max}	Масса конструкции, т
3.1	20	2	3,21	9,08	16,294
3.2	8	3	4,75	11,05	17,02

(третья расчетная ситуация) характеристика безопасности не соответствует минимально рекомендуемому нормативному значению.

При этом для третьей расчетной ситуации наблюдается явная склонность конструкции к прогрессирующему обращению, так, выход элементов начинается уже на втором шаге догружения, а на третьем наблюдается лавинообразное разрушение конструкции (рис. 4, *b*).

Для обеспечения требуемого минимального нормативного уровня характеристики безопасности β_{\min} увеличим сечение элементов, приведенных на рис. 4, *a* (20 стержней), на одну позицию сортамента и проведем повторный расчет конструкции.

Результаты расчета приведены в табл. 2 (3.1 — исходные параметры, 3.2 — параметры опоры с увеличенными сечениями элементов).

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что характеристика надежности после увеличения сечений 20 наиболее ответственных элементов системы составила 4,75, что превышает рекомендуемое минимальное значение на 0,05.

Уменьшилась склонность рассматриваемой опоры к лавинообразному обрушению, так как количество шагов догружений до начала выхода элементов увеличилось на единицу.

Таким образом, обоснованно определив группу наиболее ответственных элементов конструкции и увеличив их поперечные сечения, обеспечивается рекомендованный уровень надежности системы. При этом масса опоры увеличилась не критично с 16,294 до 17,02 т, что составило 4,46 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика анализа склонности стальных стержневых конструкций опор линий электропередачи к лавинообразному обрушению, позволяющая определять наиболее опасные элементы системы для конкретно заданного вида нагружения. Совокупность таких стержней назначается

на основании обоснованного численного расчета. Расчет выполняется на базе МКЭ в геометрически и конструктивно-нелинейной постановке.

Предложена методика вычисления характеристик надежности стальных стержневых опор линий электропередачи. В качестве ключевой характеристики надежности предлагается использовать дальность отказа (характеристику безопасности) β . При этом искомое значение данной характеристики будет находиться между нижней границей надежности β_{\min} (характеристика одного наиболее ответственного элемента системы) и верхней границей β_{\max} (характеристика для группы наиболее ответственных элементов системы), определенных при анализе конструкции на склонность к лавинообразному обрушению.

Предложенные методики апробированы на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы. В режиме с наибольшими нагрузками значение характеристики безопасности ($\beta_{\min} = 3,21$) приняло меньше рекомендуемого ГОСТ ($\beta_{\text{норм}} = 4,7$). После увеличения сечений группы наиболее ответственных элементов (20 стержней) и повторном определении характеристики надежности она превысила минимально рекомендуемый уровень и составила $\beta_{\min} = 4,75$. Масса конструкции увеличилась всего на 4,46 % с 16,294 до 17,02 т.

Разработанные методики позволяют определять «тонкие места» стержневых опор линий электропередачи и увеличивать сечения элементов с целью обеспечения рекомендуемого уровня надежности для обоснованного количества конкретных стержней. Это дает возможность значительно сократить металлоемкость опоры при обеспечении рекомендуемого уровня надежности системы на этапе проектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Соловьев Д.В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности //

Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 14–19. EDN VRJMYQ.
2. Бармотин А.А., Дмитренко Е.А., Волков А.С., Маисталер С.Н., Недорезов А.В., Казак К.А. и др.

Информационное моделирование при выполнении обследования зданий // Современное промышленное и гражданское строительство. 2024. Т. 20. № 2. С. 93–109. EDN WFDUZE.

3. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Муцанов А.В. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 1. С. 6–23. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1. EDN WGPYND.

4. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Кащенко М.П., Зубенко А.В. Надежность пространственных стержневых конструкций усеченных большепролетных куполов // Металлические конструкции. 2023. Т. 29. № 1. С. 47–61. EDN RWWBHA.

5. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Кащенко М.П., Дудов Н.В. Обеспечение регламентируемого уровня надежности стальной стержневой конструкции повышенной ответственности на примере покрытия СК «Ильичёвец» в г. Мариуполь // Металлические конструкции. 2025. Т. 31. № 1. С. 35–46. DOI: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. EDN ICQFZG.

6. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Муцанов А.В., Цепляев М.Н. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 763–777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777. EDN GEAKON.

7. Смирнова Н.С. Оптимизация реконструкции воздушных линий электропередачи с учетом надежности энергоснабжения потребителей : дис. ... канд. техн. наук. Макеевка, 2023. 187 с.

8. Сенькин Н.А. Учет прогрессирующего обрушения при проектировании опор воздушных линий электропередачи // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 37–46. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. EDN MXCQXB.

9. Сенькин Н.А., Филимонов А.С. Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 101–108. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108. EDN SCMQKH.

10. Arsalan H., Zeashan H., Qi H. Monitoring of Overhead Transmission Lines : a Review from the Perspective of Contactless Technologies // Sensing and Imaging. 2017. Vol. 18. Issue 1. DOI: 10.1007/s11220-017-0172-9

11. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 5. P. 052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010

12. Fu X., Li H.N., Li G., Dong Z.Q., Zhao M. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity // Engineering Structures. 2021. Vol. 233. P. 111913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111913

13. Fu X., Wang J., Li H.N., Li J.X., Yang L.D. Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019. Vol. 190. Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.011

14. Филимонов А.С. Предложения по защите промежуточной опоры ВЛ 750 кВ с оттяжками от прогрессирующего обрушения // Серия «Строительство» : сб. ст. магистрантов и аспирантов. 2021. С. 391–398. EDN LNFUUV.

15. Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Федорова С.Р. Мониторинг одностоечных свободностоящих опор воздушных линий электропередачи при действии ветровых нагрузок // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 73–78. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-73-78. EDN ZSSEHX.

16. Kondrateva O.E., Voronkova E.M., Loktionov O.A. Impact assessment of weather and climate events on overhead transmission lines reliability with voltages up to 110-220 kV // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388054

17. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Ademola H.A., Pisareva M.M. Dynamic behavior of power transmission line supports under wind influence // Magazine of Civil Engineering. 2025. No. 18 (1). P. 13301. DOI: 10.34910/MCE.133.1

Поступила в редакцию 13 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 16 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 16 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Анатолий Николаевич Оржеховский — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА); 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; РИНЦ ID: 968202, Scopus: 57214804876, ResearcherID: AAP-3799-2021, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Антон Владимирович Танасогло — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1213498, Scopus: 56826221800, ResearcherID: JFA-6248-2023, ORCID: 0000-0002-1825-2738; a.v.tan@mail.ru;

Игорь Михайлович Гаранжа — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строитель-

ный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 564746, Scopus: 56437725200, ResearcherID: AAD-8595-2022, ORCID: 0000-0002-6687-7249; garigo@mail.ru;

Владимир Филиппович Мущанов — доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; SPIN-код: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Наталья Сергеевна Смирнова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; Scopus: 59175404500, ResearcherID: NHP-9779-2025, ORCID: 0009-0009-0589-1686; n.s.smirnova@donnasa.ru.

Вклад авторов:

Оржеховский А.Н. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Танасогло А.В. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Гаранжа И.М. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Мущанов В.Ф. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Смирнова Н.С. — написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Ensuring the reliability of building structures is a priority task for designers [1, 2]. If the calculation and design of standard structures for mass construction are carried out in accordance with current regulatory documents, such as CP, GOST, etc., then the issue of ensuring a guaranteed minimum required level of reliability is implemented using various types of reliability coefficients [3, 4].

In the case of non-standard structures or structures with an increased level of responsibility, the destruction of which can lead to significant economic consequences or human casualties, it becomes expedient to use probabilistic-statistical methods to justify the real physical and mechanical characteristics of materials [5]. In this case, the required level of system reliability is determined by bringing the numerical reliability characteristics to the minimum values required by the standards, which are presented in GOST R ISO 2394–2016 “Building structures. Basic principles of reliability”.

The safety factor β and the probability of failure P_f are used as numerical reliability characteristics [6]. Determining these is a difficult task for an engineer. GOST R ISO 2394–2016 provides a number of methods for calculating the probability of failure:

- precise analytical methods;
- numerical integration methods;
- approximate analytical methods (FORM/SORM moment methods);
- modelling methods or a combination of these methods.

For complex systems that are statically indeterminate in many ways, the use of precise analytical methods and numerical integration methods is practically

impossible. This is because it is impossible to establish a target reliability function. Modelling methods require considerable time and resources, turning the engineering task into a scientific research project. In essence, FORM methods (methods for determining the reliability of first-order building structures) remain, since SORM methods (methods for determining the reliability of second-order building structures using random processes in the description of stochastic quantities) are extremely difficult to implement [7]. At the same time, current regulatory documents do not provide a clear algorithm for determining the reliability characteristics of a structure, limiting themselves to general recommendations and descriptions of the proposed methods.

In conclusion, it can be noted that modern engineers need a clear and unambiguous methodology for determining reliability characteristics, allowing them to reasonably ensure the specified level of reliability of all elements of a building structure. This issue is particularly acute when working with structures of increased responsibility class KS-3.

The aim of the study is to develop a methodology for analyzing the susceptibility of overhead line (OL) support structures to avalanche-like collapse.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- a method for calculating the reliability characteristics of steel rod power line supports based on the use of failure distance was developed;
- an analysis of the stress-strain state (SSS) of lattice tower supports was performed in order to ensure the recommended level of reliability for a reasonable number of specific rods, which made it possible to reduce the metal capacity of the supports while ensuring the recommended level of reliability at the design stage;

- the developed methodology was tested on a U220-2+9 metal anchor-angle support in various operating modes.

The subject of the study is the numerical reliability indicators of the structural elements of lattice tower supports for overhead power lines.

The objects of the study are the structures of steel double-circuit lattice tower anchor-corner supports for 220 kW power lines.

MATERIALS AND METHODS

High-voltage power lines are complex composite systems that supply electricity to consumers of various capacities. Depending on the level of consequences in the event of destruction or failure of the power line, support structures can be classified as KS-3 or KS-2, in accordance with the gradation used in GOST 27751–2014.

An analysis of publications devoted to ensuring the strength and reliability of the technical condition of steel power line support structures shows that significant contributions to the study of this issue have been made by: E.V. Gorokhov, E.V. Shevchenko, V.N. Vasilev, V.I. Zolotarev, N.A. Senkin [8, 9], I.P. Smirnov, A.V. Kozlov, N.A. Semenov, as well as J. Smith, A. Johnson, K. Müller, M. Garcia, H. Tanaka, L. Wei, E. Johnson, J. Martinez, and others. The works of these authors pay serious attention to the issues of monitoring the technical condition and studying the stress-strain state of structures. Design approaches for strengthening elements and node connections have been developed.

Some of the above authors consider issues of cascading collapse of power lines on a line-wide scale, but do not touch upon the area of avalanche-like collapse of a specific support [10, 11]. At the same time, ensuring that the support structure is not prone to avalanche-like collapse is specified in regulatory documents. This criterion is especially important for anchor, corner, and end supports. Not many authors deal with the issue of ensuring resistance to progressive collapse. A number of foreign researchers [12, 13] and Russian researchers [14, 15] should be noted. However, in all these works, the analysis is carried out using software packages such as LIRA or its analogues. Consequently, all the above-discussed controversial issues are not addressed.

Reliability is considered to be the condition of a structure without defects or damage. If any are found, they must be eliminated (by reinforcing structural elements or assemblies). After that, the support is considered to meet reliability requirements. Numerical reliability characteristics are not established and the reliability level of the structure is not analyzed. In turn, regulatory documents define reliability as the ability of a structure to perform its functions during its design (intended) service life. Accordingly, the question arises about the effectiveness and validity of the structural solution used for reinforcement.

The reliability of a power line structure is directly related to its ability to withstand progressive collapse

of the system. CP 385.1325800.2018 provides recommendations on selecting the excluded element of frame structures for forming a secondary design scheme. The secondary design scheme is used to analyze the structure's susceptibility to progressive collapse. It is worth emphasizing the lack of a clear, understandable, regulated algorithm for selecting the excluded support element when analyzing the structure's susceptibility to progressive collapse. This creates uncertainty in the approach to calculation. In some cases, the use of a dynamic coefficient equal to two when excluding an element from the primary calculation scheme also raises concerns. In structures made of low-carbon steel, instantaneous (brittle) failure of an element is unlikely. Consequently, a clear and understandable algorithm is required for engineers to select the most critical elements of overhead line structures, the failure of which will inevitably lead to progressive collapse.

Design standards based on reliability theory aim to achieve a certain probability that the structure under development will be suitable for use during a specific period, taking into account its design life:

$$P_{fail}(T) \leq [P_{fail}], \quad (1)$$

where $[P_{fail}]$ is the prescribed failure probability value.

From the analysis of inequalities, it becomes clear that the main tasks of design standards are to justify both parts of the inequality — the right and the left.

To prove the right side of the inequality, i.e. to determine the required level of reliability, it is necessary to perform a probabilistic optimal design task, taking into account not only economic factors but also social criteria.

In simplified form $[P_{fail}]$ for the case of establishing the probability of failure of a structure caused by any reason during its design life $[P_{fail}]''$, it is proposed to define it as:

$$[P_{fail}]'' = \frac{10^{-4} \zeta_s T}{L}, \quad (2)$$

where ζ_s is the social significance coefficient; T is the design life of the structure; L is the average number of people inside the structure or in its immediate vicinity during the period for which the risk is assessed.

Considering that due to the presence of random errors, defects, and imperfections that may occur during the design, installation, and operation of a structure, it is proposed to relate the theoretical and actual probability of failure in a very simplified form by the ratio $[P_{fail}] = 0,1[P_{fail}]''$.

Then the required value of the theoretical probability of failure will take the form:

$$[P_{fail}] = \frac{10^{-5} \zeta_s T}{L}. \quad (3)$$

Simplified approaches are used to calculate the values of $P_{fail}(T_i)$:

- *1st level methods*, for which an acceptable reliability value is ensured by a certain number of partial

reliability coefficients introduced to the characteristic (standard) values of the initial quantities;

- *2nd level methods*, for which reliability is checked only at the point on the boundary of the failure region, and inequality is checked by comparing the reliability index.

Based on Level 1 methods, the paper proposes an algorithm for calculating numerical reliability indicators in the form of a safety characteristic β . The algorithm is implemented in the MATLAB programming language and consists of two main calculation blocks. The first block identifies the group of most critical elements, the failure of which is critical for the entire system and will inevitably lead to an avalanche-like collapse. For this purpose, a geometrically and structurally nonlinear calculation is performed, where, within the framework of one type of load, the system is gradually loaded with an additional load and the elements that have failed are recorded. The rods that no longer satisfy the strength conditions are recorded as the additional load increases and are transferred to the second calculation block.

The group of elements that failed in the first stage (sometimes the second stage is also taken into account, depending on the desired accuracy of the system analysis and the number of elements) is considered the most critical and is transferred to the second calculation block.

In the second calculation block, numerical reliability characteristics are calculated for the group of the most critical elements. The main characteristic is the failure range or safety characteristic. The geometric characteristics of the flat cross-sections of the elements, the strength characteristics of the material (yield strength of the material), wind load, snow load, and geometric parameters of the structure in the form of node coordinate deviations are considered as stochastic variables. The safety characteristic is calculated using the finite element method (FEM) in a probabilistic setting.

Using a random number generator, random variables are generated within the framework of predefined distribution laws. Based on the Monte Carlo method, the safety characteristics of the group of most critical elements are calculated.

The results of the calculations within the second calculation block are two values:

- β_{\min} — the minimum value of the safety characteristic from the group of the most critical elements of the system;
- β_{\max} — safety characteristics of the group of the most critical elements of the system operating in parallel.

These two values will determine the upper and lower limits of the reliability of the structure.

RESULTS OF THE RESEARCH

The proposed method for analyzing the system's susceptibility to avalanche-like collapse, as well as for calculating numerical indicators of structural reliability,

was tested on a U220-2+9 metal anchor-angle support in various operating modes.

Calculation situations for operating mode IIIk were considered:

- 1) end support;
- 2) broken wire providing the greatest torque to the support;
- 3) cable not broken.

The material of the structures is carbon steel for welded structures VSt3 according to GOST 380-71*, corresponding to C245. The elements of the sections are connected with bolts of normal accuracy class 5.6. The belts of adjacent sections are connected to each other with flanges on bolts of class 5.6.

The belts of the first three lower sections of the support are made of 200×16 mm angle iron, then the belt cross-section changes to 160×10 mm angle iron (upper section) (Fig. 1). The cable support belts are made of 80×6 mm angle iron. The cross-sections of the braces within one section are identical: the braces of the base

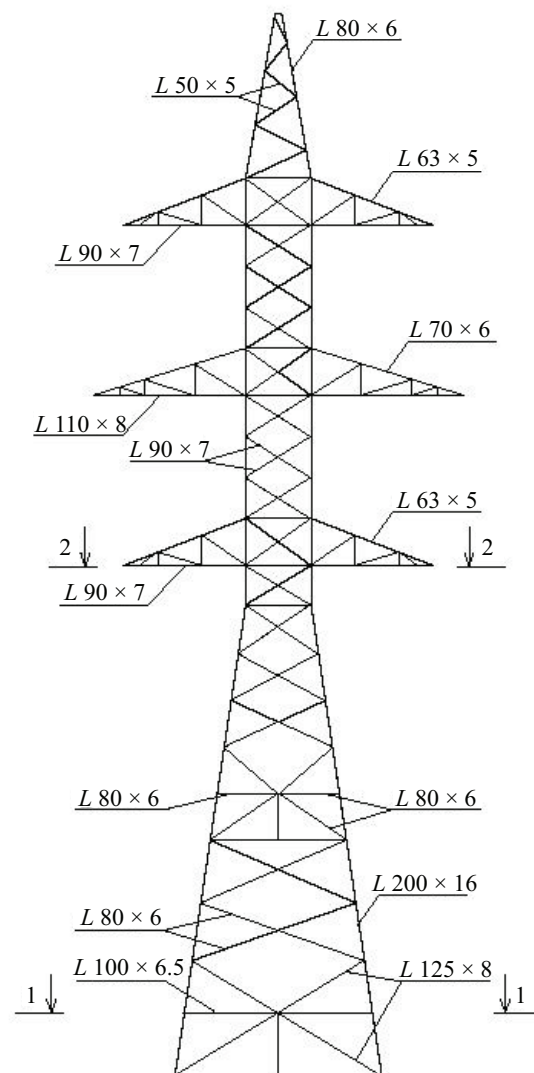


Fig. 1. Cross-sections of the main elements of the U220-2+9 support

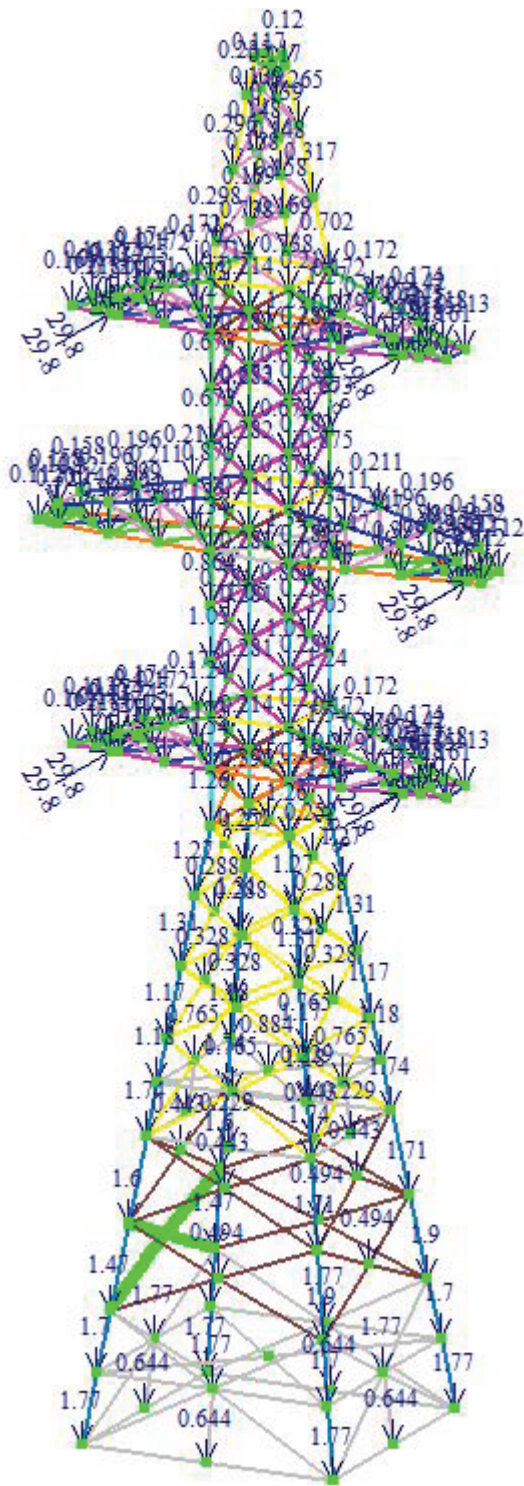
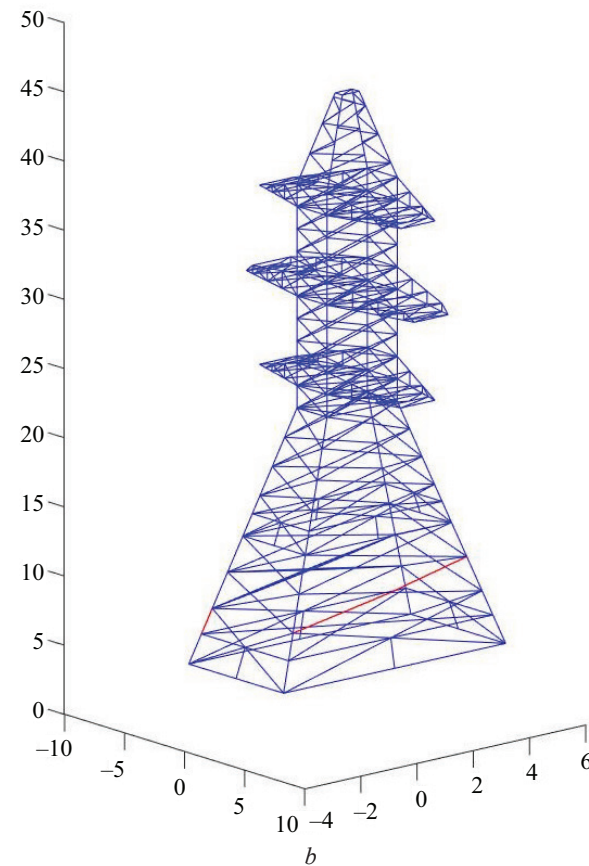
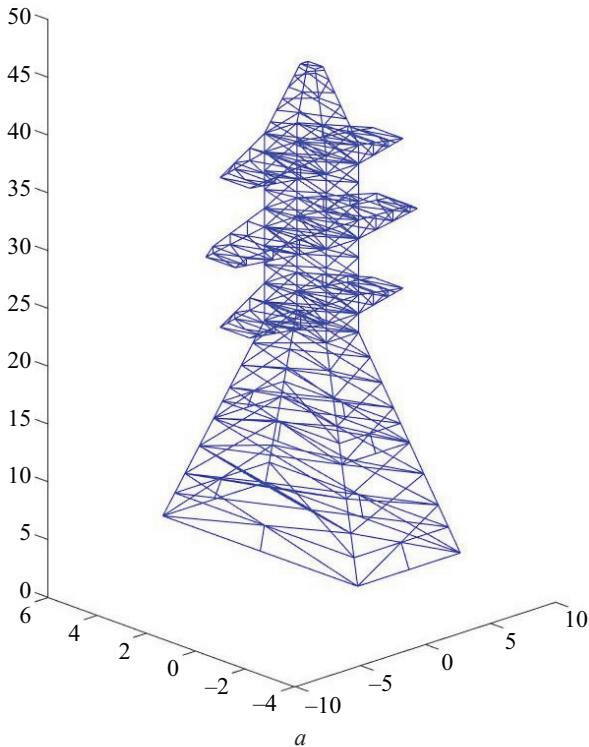


Fig. 2. Design diagram of the end support U220-2+9 for verification calculations in LIRA-CAD (first design situation)

are made of 125 × 8 mm angle iron, the braces of the first two lower sections are made of 80 × 6 mm angle iron, the braces of the upper sections are made of 90 × 7 mm angle iron, and the braces of the cable stand are made of 50 × 5 mm angle iron. The belts of the lower and upper crossbars are made of 90 × 7 mm angle iron, and the middle crossbar is made of 110 × 8 mm angle iron. The rods of the lower and upper crossbars

are made of 63 × 5 mm angle iron, and the middle crossbar is made of 70 × 6 mm angle iron. Diaphragms: lower sections — 100 × 6.5 mm angle bar, at the points of connection to the crossbars — 110 × 8 mm angle bar.

The following are considered as random variables: the dead weight of the structure, ice load [16], defects



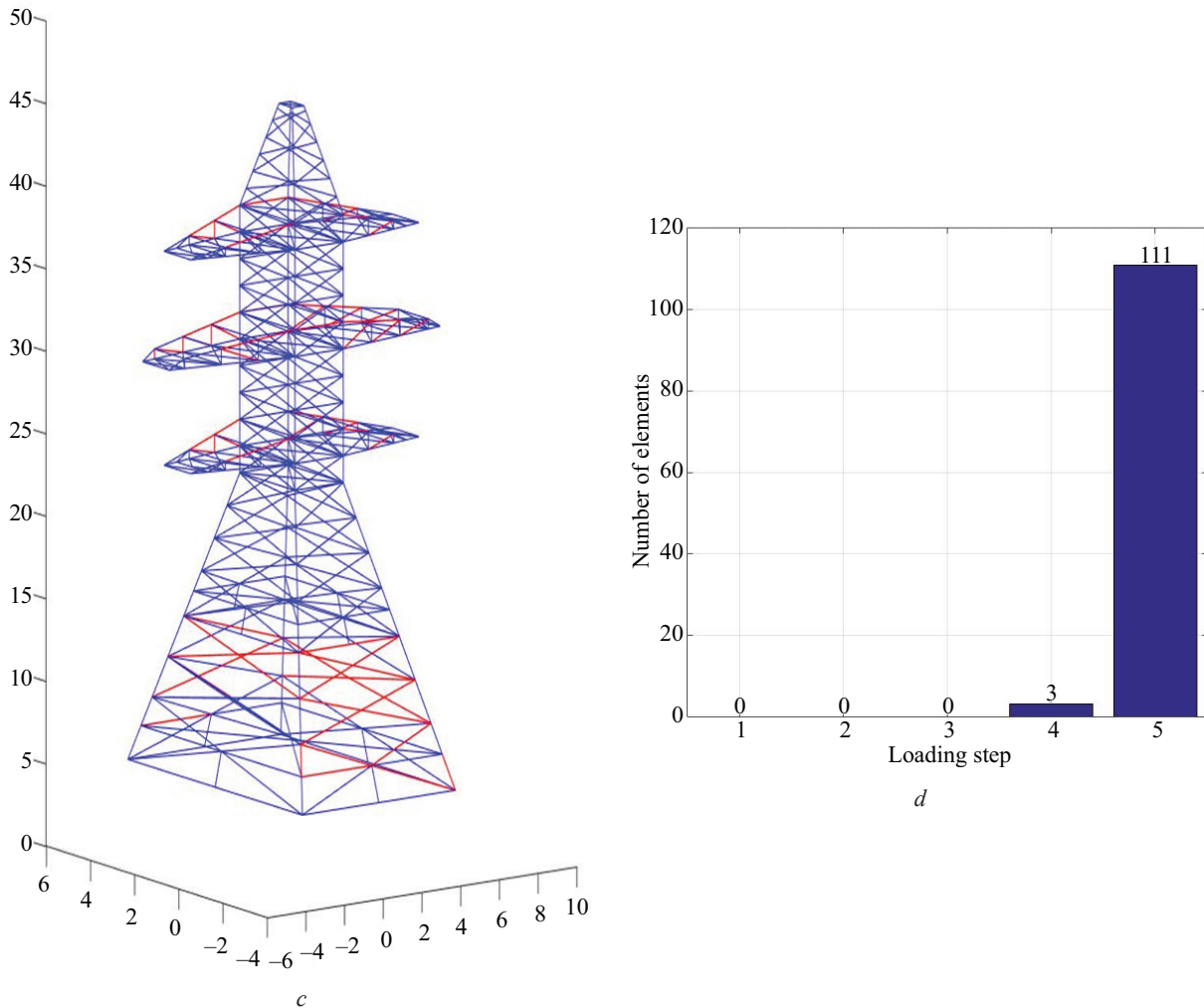


Fig. 3. Calculation of the U220-2+9 support (calculation situation 2): *a* — initial calculation diagram in MATLAB; *b* — 4th loading step, elements that have failed (3 pcs.); *c* — 5th loading step, elements that have failed (111 pcs.); *d* — graph of element failure during loading of the structure with a temporary load

in the geometry of the structure [17], and the strength properties of the material (yield strength or conditional yield strength).

The design diagram of the support (functioning as an end support), created in the LIRA-CAD software package for verification calculations, is shown in Fig. 2. The graphical data for the first and second design situations are similar and are shown in Fig. 3 for the second design situation. Information on the third design situation is presented in Fig. 4.

The results of the numerical experiment are shown in Table 1.

Analyzing the data obtained, it can be said that at maximum loads on the support (third design situation), the safety characteristic does not correspond to the minimum recommended standard value.

At the same time, for the third design situation, there is a clear tendency for the structure to undergo progressive failure, with the failure of elements beginning already at the second stage of loading, and avalanche-like failure of the structure observed at the third stage (Fig. 4, *b*).

To ensure the required minimum standard safety characteristic β_{min} , we will increase the cross-section of the elements shown in Fig. 4, *a* (20 rods) by one size and recalculate the structure.

The calculation results are shown in Table 2 (3.1 — initial parameters, 3.2 — parameters of the support with increased cross-sections of elements).

Analyzing the results obtained, it should be noted that the reliability characteristic after increasing the cross-sections of the 20 most critical elements of the system was 4.75, which exceeds the recommended minimum value by 0.05.

The tendency of the support under consideration to avalanche-like collapse decreased, as the number of reloading steps before the elements began to fail increased by one.

Thus, by reasonably determining the group of the most critical structural elements and increasing their cross-sections, the recommended level of system reliability is ensured. At the same time, the weight of the support increased non-critically from 16.294 to 17.02 tonnes, which amounted to 4.46 %.

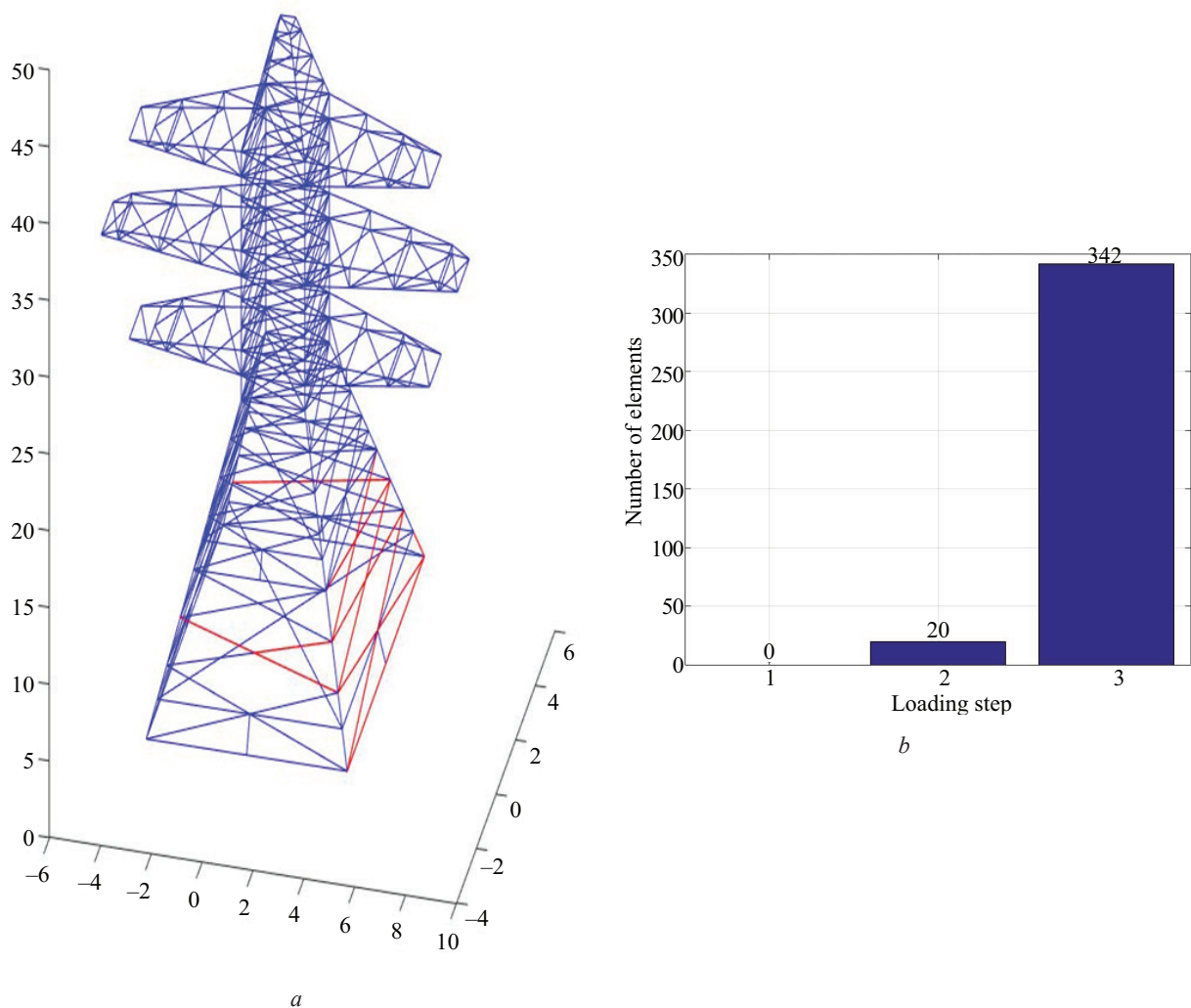


Fig. 4. Calculation of support U220-2+9 (calculation situation 3): *a* — 4th loading step, elements that have failed (20 pcs.); *b* — graph of element failure during loading of the structure with a temporary load

Table 1. Results of numerical determination of the reliability of support U220-2+9

Calculation scenario number	Number of most critical elements	Number of loading steps	β_{\min}	β_{\max}	GOST R ISO 2394–2016 β
1	3	4	9.32	13.95	4.7
2	3	4	6.00	15.17	
3	20	2	3.21	9.08	

Table 2. Selection of the cross-section of support elements U220-2+9 taking into account the recommendations of GOST R ISO 2394–2016

Calculation scenario number	Number of most critical elements	Number of loading steps	β_{\min}	β_{\max}	Structure weight, t
3.1	20	2	3.21	9.08	16.294
3.2	8	3	4.75	11.05	17.02

CONCLUSION AND DISCUSSION

A method has been developed for analyzing the susceptibility of steel rod structures of power line supports to avalanche-like collapse, which allows the most dangerous elements of the system to be identified for a specific type of load. The set of such rods is determined on the basis of a well-founded numerical calculation. The calculation is performed on the basis of FEM in a geometrically and structurally nonlinear setting.

A method for calculating the reliability characteristics of steel rod power line supports is proposed. It is proposed to use the failure range (safety characteristic) β as the key reliability characteristic. In this case, the desired value of this characteristic will be between the lower reliability limit β_{\min} (characteristic of one of the most critical elements of the system) and the upper limit β_{\max} (characteristic for a group of the most critical elements of the system), determined during

the analysis of the structure for susceptibility to avalanche-like collapse.

The proposed methods have been tested on a metal anchor-corner support U220-2+9 in various operating modes. In the mode with the highest loads, the safety characteristic value ($\beta_{\min} = 3.21$) was less than the GOST recommendation ($\beta_{\text{norm}} = 4.7$). After increasing the cross-sections of the group of the most critical elements (20 rods) and re-determining the reliability characteristic, it exceeded the minimum recommended level and amounted to $\beta_{\min} = 4.75$. The weight of the structure increased by only 4.46 % from 16.294 to 17.02 tonnes.

The developed methods allow identifying the “weak spots” of transmission line pole supports and increasing the cross-sections of elements in order to ensure the recommended level of reliability for a reasonable number of specific poles. This makes it possible to significantly reduce the metal capacity of the support while ensuring the recommended level of system reliability at the design stage.

REFERENCES

1. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Solovyev D.V. Scientific and technical support and standard requirements when realizing projects of buildings and structures with increased level of responsibility. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 12:14-19. EDN VRJMYQ. (rus.).
2. Barmotin A., Dmitrenko E., Volkov A., Mashtaler S., Nedorezov A., Kazak K. et al. Information modeling when performing building surveys. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2024; 20(2):93-109. EDN WFDUZE. (rus.).
3. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Tseplyaev M.N., Mushchanov A.V. An integrated approach to reliability assessment of spatial metal structures. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):6-23. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1. EDN WGPYND. (rus.).
4. Mushchanov V., Orzhehovskiy A., Kashchenko M., Zubenko A. Reliability of spatial core structures of truncated large-span domes. *Metall Constructions*. 2023; 29(1):47-61. EDN RWVBHA. (rus.).
5. Mushchanov V.F., Orzhehovskiy A.N., Kashchenko M.P., Dudov N.V. Ensuring a regulated level of reliability of a high-responsibility steel core structure using the example of the coating of the Ilyichevets ic in Mariupol. *Metall Constructions*. 2025; 31(1):35-46. DOI: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. EDN ICQFZG. (rus.).
6. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(5):763-777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777. EDN GEAKOH. (rus.).
7. Smirnova N.S. *Optimization of reconstruction of overhead power lines taking into account the reliability of power supply to consumers*. Makeevka, 2023; 187. (rus.).
8. Senkin N.A. Consideration of progressive collapse in the design of overhead power transmission line supports. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4(93):37-46. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. EDN MXCQXB. (rus.).
9. Senkin N.A., Filimonov A.S. Interaction of structural elements in the overhead transmission power line. *Housing Construction*. 2024; 1-2:101-108. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108. EDN SCMQKH. (rus.).
10. Arsalan H., Zeashan H., Qi H. Monitoring of Overhead Transmission Lines : a Review from the Perspective of Contactless Technologies. *Sensing and Imaging*. 2017; 18(1). DOI: 10.1007/s11220-017-0172-9
11. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(5):052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010
12. Fu X., Li H.N., Li G., Dong Z.Q., Zhao M. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity. *Engineering Structures*. 2021; 233:111913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111913
13. Fu X., Wang J., Li H.N., Li J.X., Yang L.D. Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019; 190:119-133. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.011

14. Filimonov A.S. Proposals for the protection of intermediate support of 750 kV overhead power line with guy wires from progressive collapse. *Series "Construction" : collection of articles by master's and postgraduate students*. 2021; 391-398. EDN LNFUUV. (rus.).

15. Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Fedorova S.R. Monitoring of single-post free-standing supports of overhead power lines under the action of wind loads. *Housing Construction*. 2023; 12:73-78. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-73-78. EDN ZSSEHX. (rus.).

16. Kondrateva O.E., Voronkova E.M., Loktionov O.A. Impact assessment of weather and climate events on overhead transmission lines reliability with voltages up to 110–220 kV. *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2021; 1-6. DOI: 10.1109/REEPE-51337.2021.9388054

17. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Ademola H.A., Pisareva M.M. Dynamic behavior of power transmission line supports under wind influence. *Magazine of Civil Engineering*. 2025; 18(1):13301. DOI: 10.34910/MCE.133.1

Received May 13, 2025.

Adopted in revised form on May 16, 2025.

Approved for publication on May 16, 2025.

B I O N O T E S : **Anatoliy N. Orzhehovskiy** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; ID RSCI: 968202, Scopus: 57214804876, ResearcherID: AAP-3799-2021, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Anton V. Tanasoglo — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1213498, Scopus: 56826221800, ResearcherID: JFA-6248-2023, ORCID: 0000-0002-1825-2738; a.v.tan@mail.ru;

Igor M. Garanzha — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 564746, Scopus: 56437725200, ResearcherID: AAD-8595-2022, ORCID: 0000-0002-6687-7249; garigo@mail.ru;

Vladimir F. Mushchanov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Vice-Rector for Research; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; SPIN-code: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Natalia S. Smirnova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Structures and Facilities; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; Scopus: 59175404500, ResearcherID: NHP-9779-2025, ORCID: 0009-0009-0589-1686; n.s.smirnova@donnasa.ru.

Contribution of the authors:

Anatoliy N. Orzhehovskiy — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Anton V. Tanasoglo — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Igor M. Garanzha — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Vladimir F. Mushchanov — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Natalia S. Smirnova — writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

The authors declare that they have no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 725

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.6

Обоснование функционального состава многофункциональных общественных комплексов на основе развития требований к их проектированию

Ольга Леонидовна Банцеровая, Маргарита Игоревна Иванова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Обосновывается важность комплексного подхода к проектированию и организации многофункциональных общественных комплексов (МОК), акцентируется внимание на взаимосвязи функциональных компонентов и их роли в формировании полифункциональных общественных структур. В условиях роста жизненных потребностей общества роль общественных зданий претерпела значительные изменения, начиная с древнеримских и средневековых прототипов до современных МОК. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в области архитектуры и градостроительства, а также при разработке новых нормативных документов.

Материалы и методы. Применяемый метод системного анализа, который включает изучение эволюционных преобразований нормативных документов, анализ влияния исторических этапов, характеризующих возникновение новых функций общественных зданий, позволил выявить предпосылки формирования многофункциональных общественных структур, определить функционально-планировочные компоненты и сформулировать их значимость в структуре МОК.

Результаты. Проведен анализ эволюции функционального состава МОК на основе исторического развития нормативных документов в строительной сфере Российской Федерации. Исследование охватывает эволюцию нормативных требований начиная с XVIII в. и до настоящего времени, отражая ключевые этапы становления функций общественных зданий. Установлено, что формирование нормативной базы началось с введения первых строительных регламентов, таких как «Должность архитектурной экспедиции», и перешло к созданию дифференцированных систем, таких как СНиП и современные своды правил. Особое внимание уделено выделению многофункциональных объектов как отдельной типологической группы и изучению их роли в удовлетворении широкого спектра потребностей населения. Авторы классифицируют функционально-планировочные компоненты МОК на комплексообразующие (главенствующие, симбиотические и предметные) и дополнительные. В числе ключевых функций выделены торговая, административно-деловая, жилая, рекреационная и мемориальная.

Выводы. Выявлены предпосылки формирования многофункциональных общественных структур, определены функционально-планировочные компоненты и сформулирована их значимость в структуре МОК.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многофункциональные общественные комплексы, функционально-планировочные компоненты, функциональное назначение общественных зданий, эволюционные преобразования, многофункциональное здание, комплексообразующие функционально-планировочные компоненты, главенствующие функционально-планировочные компоненты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Банцеровая О.Л., Иванова М.И. Обоснование функционального состава многофункциональных общественных комплексов на основе развития требований к их проектированию // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.6

Автор, ответственный за переписку: Иванова Маргарита Игоревна, margo.ivanova2010@yandex.ru.

Substantiation of the functional composition of multifunctional public complexes based on the development of requirements for their design

Olga L. Bantserova, Margarita I. Ivanova

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

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the importance of an integrated approach to the design and organization of MPC, focusing on the interrelation of functional components and their role in the formation of multifunctional public structures. With the growing vital needs of society, the role of public buildings has undergone significant changes from ancient Roman and medieval prototypes to modern MPC. The results obtained can be used for further research in the field of architecture and urban planning, as well as in the development of new normative documents.

Materials and methods. The applied method of system analysis, which includes the study of evolutionary transformations of normative documents, analysis of the influence of historical stages characterizing the emergence of new functions of public buildings, allowed to identify the prerequisites for the formation of multifunctional public structures, to determine the functional-planning components and to formulate their significance in the structure of multifunctional public complexes.

Results. The presented work provides an in-depth analysis of the evolution of the functional composition of multifunctional public complexes (MPC) based on the historical development of normative documents in the construction sphere of the Russian Federation. The study covers the evolution of regulatory requirements from the 18th century to the present day, reflecting the key stages of the formation of the functions of public buildings. It is established that the formation of the regulatory framework began with the introduction of the first building regulations, such as the "Duty of Architectural Expedition", and moved on to the creation of differentiated systems, such as Construction Standards and Regulations and modern codes of rules. Special attention is paid to distinguishing multifunctional objects as a separate typological group and studying their role in meeting a wide range of population needs. The authors classify the functional-planning components of the MPC into complex-forming (dominant, symbiotic and subject) and additional ones. Among the key functions are commercial, administrative and business, residential, recreational and memorial.

Conclusions. The prerequisites for the formation of multifunctional public structures are revealed, functional-planning components are defined and their significance in the structure of a multifunctional public complex is formulated.

KEYWORDS: multifunctional public complexes, functional-planning components, functional purpose of public buildings, evolutionary transformations, multifunctional building, complex-forming functional-planning components, predominant functional-planning components

FOR CITATION: Bantserova O.L., Ivanova M.I. Substantiation of the functional composition of multifunctional public complexes based on the development of requirements for their design. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.6

Corresponding author: Margarita I. Ivanova, margo.ivanova2010@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях постоянно возрастающих жизненных потребностей людей в современном обществе развивается сфера услуг, которая реализуется через сеть учреждений торговли, культурно-просветительского назначения, общественного питания, бытового обслуживания, образования и воспитания детей, медицинского обслуживания, транспорта.

Типы общественных зданий и сооружений развивались в историческом контексте. Изменялись их видовые характеристики, функциональное назначение, возрастало их количество. Одни виды имеют древние прототипы, которые зародились еще во времена Древнего Рима и Древней Греции; другие возникли в более поздние времена, обозначенные эпохой Средневековья, Возрождения; третьи появились в наше время. Эволюционные преобразования общественных зданий приводят к возникновению в дальнейшем новых видов и типов общественных зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье используются историко-правовой, сравнительно-аналитический и системный подходы к изучению процесса формирования нормативных документов в области строительства и архитектуры. Исследование основано на анализе исторических источников, нормативно-технической документации, научных публикациях и других нормативных документов различных исторических периодов, а также сравнительном анализе существующих многофункциональных общественных комплексов, расположенных в крупнейших городах Российской Федерации.

Применяемый комплекс методов позволил всесторонне рассмотреть процесс формирования нормативных документов в строительстве и архитектуре, выявить основные закономерности их развития и предложить рекомендации по совершенствованию правового регулирования в данной сфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ показал, что многие общественные здания в процессе исторического развития, сохраняя полностью или частично свое функциональное назначение, формировались в новые типы, непрерывно преображались качественно и иногда становились непохожими или мало похожими на свои прототипы [1, 2]. Например, монастырские комплексы или медресе помимо основного религиозного назначения играли роль образовательных центров. Образование детей на Руси и зарождение школьного образования началось в 859 г. после принятия христианства, первые учебные заведения были при монастырях в Новгороде, Суздале, Смоленске, Курске. В начале XV в. на смену монастырям пришли частные школы «Мастера грамоты», которые стали новым этапом в развитии образовательных учреждений [3–6]. Появились школы как новый тип общественного здания. Еще один пример, который касается торговли. Торговые функции в средневековом городе, как правило, осуществлялись в лавках на первом этаже жилых домов. Эти архитектурно-планировочные структуры явились первоначальным образцом современных торговых учреждений (магазинов, универсамов). Конечно, большая разница существует между архитектурой современного магазина и зданием средневекового торговца с лавкой на первом этаже, жильем на втором и складом на третьем, но и в том, и в другом типе зданий выполнялись и сейчас реализуются торговые функции.

В то же время многие типы общественных зданий, такие как современный театр, картинная галерея, цирк, стадион, сохранили очень много общего со своими античными и средневековыми прототипами. В театре такие зрелищные и демонстрационные объемно-планировочные элементы, как сцена, просцениум, ложи и ряды для зрительских мест; в цирке — арена сохранили свое первоначальное функциональное назначение и общий вид со времен Древнего Рима (рис. 1).

Проследим эволюционные преобразования общественных зданий на примере анализа истории возникновения и совершенствования нормативных документов в области строительства в России, а также изучения периодов появления новых функций общественных зданий. Рассмотрели нормативные документы, начиная с первых строительных регламентов и заканчивая последними редакциями СП по проектированию общественных зданий. В результате исследования были сделаны следующие выводы, характеризующие развитие нормативных требований, предъявляемых к проектированию общественных зданий (рис. 2, 3).

1. До 1737 г. в Российской империи строительство не рассматривалось как отдельная, четко структурированная отрасль. Лишь с введением первых строительных нормативов, таких как «Должность архитектурной экспедиции», началось создание самостоятельной сферы, ориентированной на упорядочение проектирования и возведения зданий. Это способствовало формированию строительства как отдельной отрасли^{1, 2, 3}.

2. До начала XX в. религиозные объекты играли значительную роль в строительстве. В нормативных документах для них выделялись отдельные главы, что подчеркивало их важность. Однако в СССР эта функция была исключена из строительных норм,

¹ Полное собрание законов Российской империи. Первое собрание. Т. I. 1649–1825 гг. В 45 томах / под ред. М.М. Сперанского. Тип. II Отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии, 1830 г.

² Архитектурный архив 1 / под ред. Д. Аркина (отв. редактор), Н. Брунова, И. Маца, Д. Сухова, А. Шусева. М. : Издательство Академии архитектуры СССР, 1946. 144 с.

³ Устав строительный, измененный по продолжениям 1876 и 1879 гг., с разъяснениями по решениям Уголовного кассационного департамента Правительствующего Сената и приложением циркуляров Министерства внутренних дел и позднейших узаконений. Изд. третье. С.-Петербург : Типография придв. книгопр. К.К. Ретгера, 1881.



а



б

Рис. 1. Амфитеатр в Памуккале, г. Иераполис, Турция, 200 г. до н. э. (а); Национальный центр исполнительских искусств, г. Пекин, Китай, 2007 г., архитектор Поль Андре (б)



Рис. 2. Титульные страницы нормативных документов: а — Устав строительный, измененный по продолжениям 1876 и 1879 гг.; б — 1933 ОСТ 4488 «Единые нормы строительного проектирования. Общие сооружения»; в — СНиП. Часть II «Нормы строительного проектирования 1954 г.»; д — СНиП II-Л.2-62 «Общественные здания и сооружения. Основные положения проектирования»; е — СНиП II-Л.2-72 «Общественные здания и сооружения. Нормы проектирования»; ф — СНиП 2.08.02-89* «Общественные здания и сооружения»; г — СНиП 31-06-2009 «Строительные нормы и правила Российской Федерации. Общие здания и сооружения»; h — СП 118.13330.2022 «Общественные здания и сооружения»

что отражало изменения в государственной политике. С возвращением к этому вопросу в 1989 г. в СНиП 2.08.02-89* «Общественные здания и сооружения» помещения для религиозных обрядов были включены в состав объектов культурно-досуговой деятельности, но без выделения в самостоятельный раздел^{3, 4}.

3. В «Урочных уложениях», изданных Николаем I, классификация зданий осуществлялась не по их функциональному назначению, а по способу их финансирования. Объекты разделялись на казенные, религиозные и общественные здания в зависимости от источников их содержания, что отражало особенности управления строительными проектами в тот период.

4. До середины XX в. все аспекты, касающиеся строительства, — от строительных материалов и проектирования до смет и правил приемки работ — регулировались в рамках одного документа. Введение в СССР СНиП в 1954 г. положило начало созданию более дифференцированной системы нор-

мативных актов, разделенных по ключевым направлениям^{1, 3, 4}.

5. До 1972 г. перечень общественных зданий в нормативных документах представлял собой список конкретных объектов, таких как школы, больницы или театры. Лишь позже была введена классификация зданий на функциональные группы, что позволило упорядочить подход к проектированию и строительству с учетом их назначения^{5, 6, 7, 8}.

6. Появление в СНиП 2.08.02-85 «Общественные здания и сооружения» объектов многофункционального назначения как самостоятельной группы стало важной вехой в развитии общественных зда-

Этапы	Нормативный документ	Функциональное назначение
I	Строительный устав Российской империи 1832 г.	<div><div></div>Торговая</div> <div><div></div>Лечебная</div> <div><div></div>Религиозная</div> <div><div></div>Административно-деловая</div>
II	Единые нормы строительного проектирования 1930 г.	<div><div></div>Торговая</div> <div><div></div>Лечебная</div> <div><div></div>Образовательная</div> <div><div></div>Зрелищная</div> <div><div></div>Развлекательная</div> <div><div></div>Административно-деловая</div>
III	СНиП. Часть II. Нормы строительного проектирования 1954 г.	<div><div></div>Торговая</div> <div><div></div>Лечебная</div> <div><div></div>Образовательная</div> <div><div></div>Зрелищная</div> <div><div></div>Развлекательная</div> <div><div></div>Административно-деловая</div> <div><div></div>Бытовое обслуживание</div> <div><div></div>Общественное питание</div>
IV	СНиП II-Е.2–62. Передающие и приемные радиоцентры	<div><div></div>Информационно-коммуникативная</div>
	СНиП II-Л.2–62. Общественные здания и сооружения	<div><div></div>Торговая</div> <div><div></div>Лечебная</div> <div><div></div>Образовательная</div> <div><div></div>Зрелищная</div> <div><div></div>Развлекательная</div> <div><div></div>Административно-деловая</div> <div><div></div>Бытовое обслуживание</div> <div><div></div>Общественное питание</div> <div><div></div>Спортивная</div>
V, VI	СНиП II-Л.2–72. Общественные здания и сооружения	<div><div></div>Торговая</div> <div><div></div>Лечебная</div> <div><div></div>Образовательная</div> <div><div></div>Зрелищная</div> <div><div></div>Развлекательная</div> <div><div></div>Административно-деловая</div> <div><div></div>Бытовое обслуживание</div> <div><div></div>Общественное питание</div> <div><div></div>Спортивная</div> <div><div></div>Жилая</div> <div><div></div>Информационно-коммуникативная</div> <div><div></div>Культурно-просветительская</div> <div><div></div>Транспортная</div> <div><div></div>Рекреационная</div>



Рис. 3. Этапы, характеризующие возникновение новых функций общественных зданий, отраженные в нормативных документах^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14}

ний⁹. Эти здания, совмещающие в себе различные функции, сегодня выделены в отдельную функционально-типологическую группу, что свидетельствует о растущей потребности в универсальных объектах, удовлетворяющих широкий спектр потребностей населения [7–18].

На основании рассмотрения исторического развития нормативных документов в области строительства в России можно выделить несколько этапов, характеризующих возникновение новых функций общественных зданий в процессе исторического развития (рис. 3):

I. Создание первой структуризации функций общественных зданий: торговая, лечебная, религиозная, административно-деловая.

II. Пополнение списка образовательной, зрелищной и развлекательной функциями.

III. Пополнение списка функциями общественного питания и обслуживания.

IV. Выделение информационно-коммуникативной функции в отдельный тип; пополнение списка спортивной функцией.

V. Классификация общественных функций; включение информационно-коммуникативной функции в состав общественных зданий; пополнение списка жилой (временного пребывания), куль-

турно-просветительской, транспортной и рекреационной функциями.

VI. Выделение многофункциональных объектов в отдельный тип.

VII. Разделение классов общественных объектов по группам, пополнение списка общественных функций мемориальной функцией.

VIII. Выделение многофункциональных общественных комплексов (МОК) в самостоятельную группу¹⁰.

В результате рассмотрения 60 объектов МОК представлено «древо» динамики объединения функциональных компонентов «Эволюционные преобразования функционального назначения общественных зданий» (рис. 3, 4). На основании этих схем можно выделить функционально-планировочные компоненты, влияющие на формирование МОК (табл. 1).

Так как многофункциональное здание — это здание, включающее в свой состав два и более функционально-планировочного компонента, взаимосвязанные друг с другом с помощью планировочных приемов, предлагается выделить *комплексообразующие* функционально-планировочные компоненты, занимающие по площади и архитектурно-планировочной организации доминирующее положение, и *дополнительные* функционально-планировочные компоненты, занимающие по площади и архитектурно-планировочной организации маргинальное положение.

Таким образом, вышеперечисленные функционально-планировочные компоненты разделены на две группы: комплексообразующие и дополнительные. К комплексообразующим компонентам относятся: торговая, лечебная, религиозная, административно-деловая, образовательная, зрелищная, развлекательная, информационно-коммуникативная, спортивная, жилая, культурно-просветитель-

⁹ СНиП 2.08.02-85. Общественные здания и сооружения.

¹⁰ СП 160.1325800.2014. Здания и комплексы многофункциональные.

¹¹ СНиП 31-06-2009. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Общественные здания и сооружения.

¹² СНиП II-Е.2-62. Передающие и приемные радиостанции. Нормы проектирования.

¹³ СП 118.13330.2012. Общественные здания и сооружения.

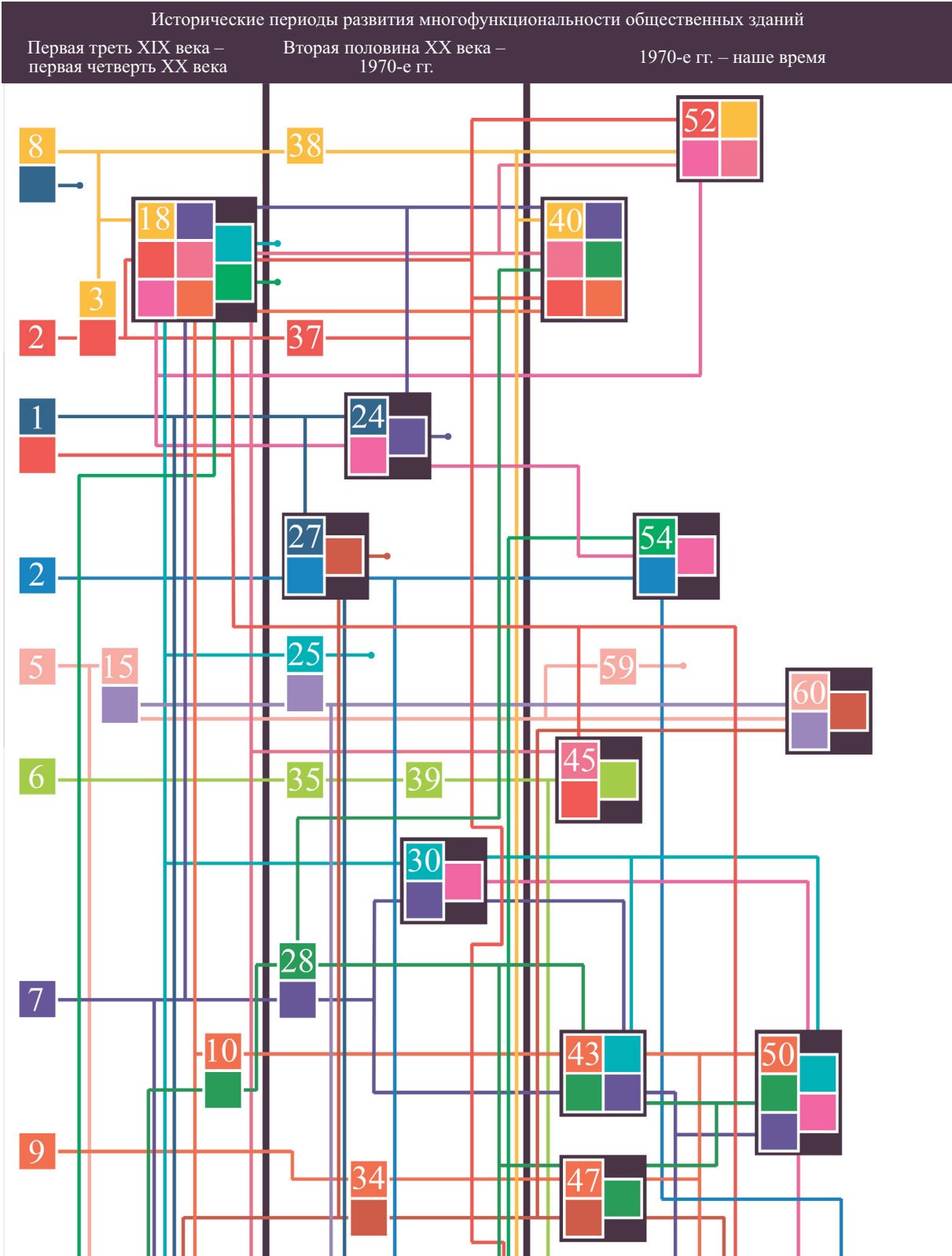
¹⁴ СП 118.13330.2022. Общественные здания и сооружения.

ская, транспортная, рекреационная, мемориальная. К дополнительным — общественное обслуживание и общественное питание.

В то же время среди комплексообразующих функционально-планировочных компонентов выделяются подтипы — главенствующие, симбиотические и предметные (табл. 2). Под симбиотиче-

скими подразумеваются компоненты, являющиеся комплексообразующими при сочетании с другими. Под предметными — компоненты, образующие МОК с преимущественной долей монофункции.

К главенствующим функционально-планировочным компонентам относятся торговый, административно-деловой, жилой, рекреационный и мемориаль-



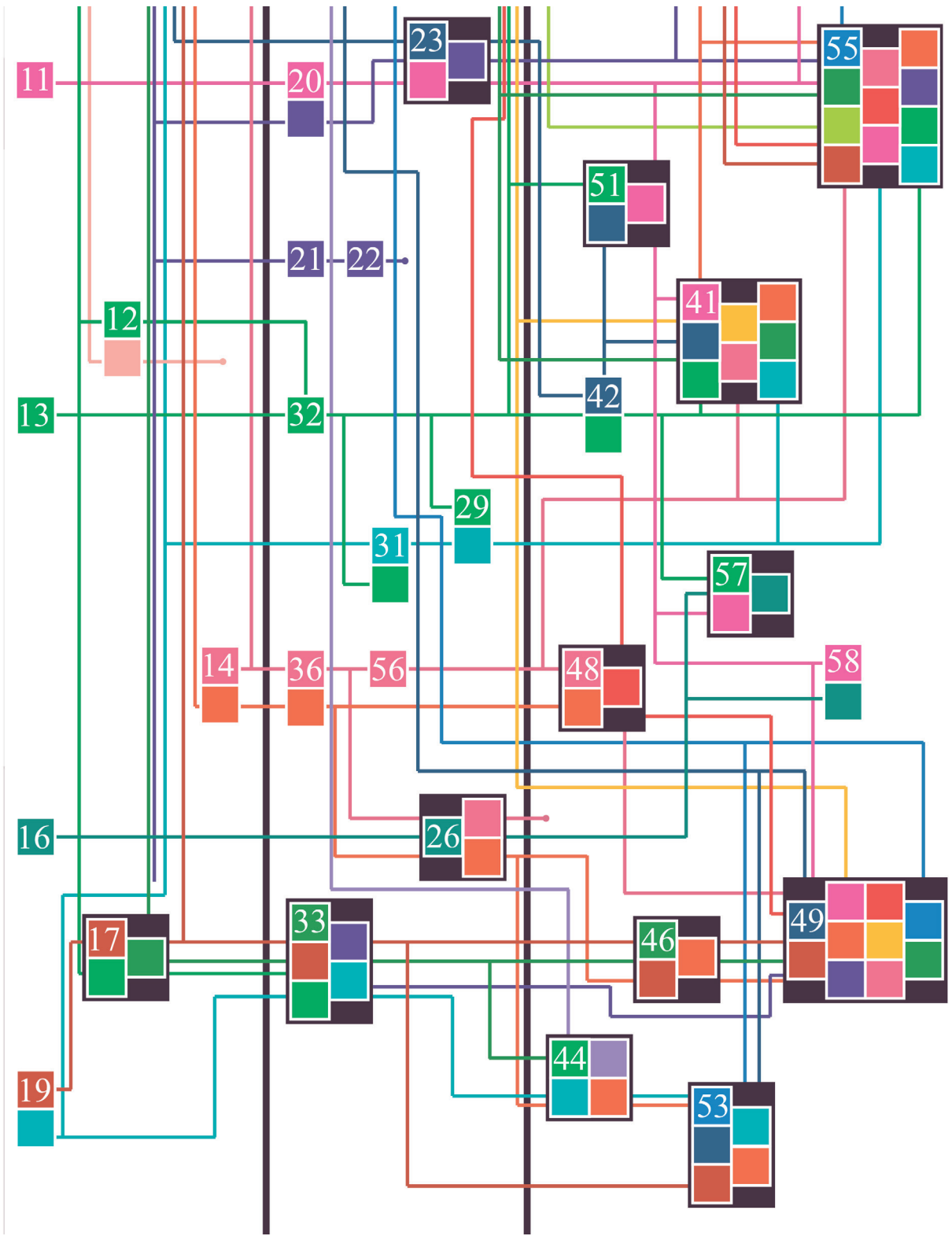


Рис. 4. «Дерево» динамики объединения функциональных компонентов

Функциональное назначение общественных зданий	Результаты эволюционных преобразований функциональных компонентов МОК
Торговая	Стала комплексобразующей функцией, объект № 40 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 45, 48, 52 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 49, 55 (рис. 5)

Окончание табл. 1

Функциональное назначение общественных зданий	Результаты эволюционных преобразований функциональных компонентов МОК
Лечебная	Стала комплексобразующей функцией, объекты № 49, 54 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объект № 55 (рис. 5)
Религиозная	Сохранилась в качестве монообъектов, объект № 59 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объект № 60 (рис. 5)
Административно-деловая	Стала комплексобразующей функцией, объект № 52 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 41, 49, 50 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 51, 54, 55, 57 (рис. 5)
Образовательная	Стала комплексобразующей функцией, объекты № 41, 42 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 51, 55, 57 (рис. 5)
Зрелищная	Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объект № 49 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 40, 43, 50, 55 (рис. 5)
Развлекательная	Стала комплексобразующей функцией, объект № 47 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 44, 46, 48, 49, 50 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 40, 43, 55 (рис. 5)
Общественное обслуживание	Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 40, 41, 49, 52 (рис. 5)
Общественное питание	Стала комплексобразующей функцией, объект № 48 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 40, 41, 45, 49, 52, 55 (рис. 5)
Информационно-коммуникативная	Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 57, 58 (рис. 5)
Спортивная	Стала комплексобразующей функцией, объект № 50 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 40, 41, 46, 47, 49 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 43, 55 (рис. 5)
Жилая	Стала комплексобразующей функцией, объект № 49 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 41, 42, 51 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объект № 53 (рис. 5)
Культурно-просветительская	Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 41, 50, 53 (рис. 5). Вошла в состав МОК как комплексобразующая функция, объекты № 43, 55 (рис. 5)
Транспортная	Стала комплексобразующей функцией, объект № 45 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объект № 55 (рис. 5)
Рекреационная	Стала комплексобразующей функцией, объекты № 46, 53 (рис. 5). Вошла в состав МОК как сопутствующая функция, объекты № 47, 49, 55 (рис. 5)
Мемориальная	Стала комплексобразующей функцией, объект № 44 (рис. 5)

Табл. 2. Типы функционально-планировочных компонентов многофункциональных общественных комплексов

Дополнительные функционально-планировочные компоненты	Комплексообразующие функционально-планировочные компоненты		
	Главенствующие	Симбиотические	Предметные
Общественное обслуживание	Торговый	Религиозный	Лечебный
Общественное питание	Административно-деловой	Зрелищный	Образовательный
—	Жилой	Информационно-коммуникативный	Развлекательный
—	Рекреационный	Культурно-просветительский	Спортивный
—	Мемориальный	—	Транспортный

Строительство: Том 15. Выпуск 3 (57)
наука и образование

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ показал, что многие общественные здания в процессе исторического развития, сохраняя полностью или частично свое функциональное назначение, формировались в новые типы, непрерывно преобразовались качественно и иногда становились непохожими или мало похожими на свои прототипы.





Рис. 5. Анализ существующих МОК по функционально-планировочным компонентам: *a* — Торгово-развлекательный центр «Авиапарк», г. Москва, Россия, 2014 г., архитектор Callison; *b* — Олимпийский парк, г. Сочи, Россия, 2014 г., архитектор Populous, Моспроект-4, Botta Management Group, ЗАО «Объединение Ингеоком», НПО «Мостовик»; *c* — ТПУ «Нижегородская», г. Москва, Россия, 2020 г., архитектор АБТБ, КНИИПИ Генплана Москвы, ОАО «МКУД», «Моспроект-3», ARTEZA; *d* — Парк развлечений «Остров мечты», г. Москва, Россия 2020 г., архитектор Cunningham Architects, Chapman Taylor, Land Milano; *e* — Фудмолл «Депо. Москва», г. Москва, Россия, 2019 г., архитектор Михаил Глейнинг, Николай Жуков; *f* — Инновационный научно-технологический центр «Сириус» (ИНТЦ), г. Сочи, Россия; *g* — Mriya Resort & Spa, г. Ялта, Россия, 2014 г., архитектор Норман Фостер; *h* — Лахта центр, г. Санкт-Петербург, Россия, 2021 г., архитектор Тони Кеттл, RMJM, Горпроект; *i* — Московский инновационный кластер «Ломоносов», г. Москва, Россия, 2023 г., архитектор KAMEN; *j* — Центральный военно-патриотический ПКЮ ВС РФ «Патриот», г. Кубинка, Россия, 2014 г.

На основании рассмотрения исторического развития нормативных документов в области строительства в России выделены несколько этапов, характеризующих возникновение новых функций общественных зданий в процессе исторического развития. Отмечается, что выделение многофункциональных общественных комплексов и появление в СНиП 2.08.02–85 «Общественные здания и сооружения» объектов многофункционального назначения как самостоятельной группы стало важной вехой в развитии общественных зданий. Эти здания, совмещающие в себе различные функции, сегодня выделены в отдельную функционально-типологическую группу, что свидетельствует о растущей потребности в универсальных объектах, удовлетворяющих широкий спектр потребностей населения.

Установлено, что функционально-планировочные компоненты в многофункциональном здании делятся на комплексобразующие (среди них выделяются главенствующие, симбиотические и предметные) и дополнительные.

В результате рассмотрения более 60 объектов МОК представлено «дерево» динамики объединения функциональных компонентов. К комплексообразующим функционально-планировочным компонентам относятся компоненты, занимающие по площади и архитектурно-планировочной организации доминирующее положение. К главенствующим функционально-планировочным компонентам относятся торговый, административно-деловой и жилой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bantserova O., Ivanova M.* Primary Methods of Forming the Adaptation of Architectural Multifunctional Public Objects // *Civil Engineering and Architecture*. 2023. Vol. 11. Issue 5. Pp. 2310–2320. DOI: 10.13189/cea.2023.110505
2. *Абрамова М.Ю., Курочкина Т.Л.* Нормативно-техническая документация: от истоков к современности // *Жилищное строительство*. 2012. № 12. С. 37–38. EDN PVRHNT.
3. *Малоян Г.А.* Основы градостроительства : учебное пособие. М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. 120 с.
4. *Цайдлер Б.* Многофункциональная архитектура. М. : Стройиздат, 1988. 151 с.
5. *Банцерева О.Л., Иванова М.И.* К вопросу преобразования многофункциональных общественных комплексов в процессе исторического развития в связи с социально-экономическими изменениями общества // *Системные технологии*. 2024. № 2 (51). С. 113–126. DOI: 10.48612/dniti/2024_51_113-126. EDN QQVAMU.
6. *Schmidt III R., Austin S.* Adaptable Architecture: theory and practice. New York : Routledge, 2016. DOI: 10.4324/9781315722931
7. *Таймурзина Э.А.* Многофункциональные здания, комплексы // *Актуальные исследования*. 2022. № 22 (101). С. 35–37. EDN SYWPCP.
8. *Haldane J.* Architecture, philosophy and the public world // *British Journal of Aesthetics*. 1990. Vol. 30. Issue 3. P. 203. EDN IPMFYP.
9. *Volchok Y.* The Notion of “high” and commitment to excellence in contemporary Russian architecture. History and project: Looking into future // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301015. EDN UYLEGR.
10. *Gagulina O., Matovnikov S.* Spatially organized vertical city as a synthesis of tall buildings and airships // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301002. EDN XXQFHF.
11. *Schuilenburg M., Peeters R.* Smart cities and the architecture of security: pastoral power and the scripted design of public space // *City, Territory and Architecture*. 2018. Vol. 5. Issue 1. Pp. 1–9. DOI: 10.1186/s40410-018-0090-8. EDN QUNCIC.
12. *Pershina A., Radzhabov M., Dormidontova T.* The problems and perspectives for the introduction of high-rise construction in Russian cities // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301014. EDN YVWFCD.
13. *Generalov V.P., Generalova E.M., Kalinkina N.A., Zhdanova I.V.* Typological diversity of tall buildings and complexes in relation to their functional structure // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301020. EDN YVWDSD.
14. *Abdrassilova G., Kozbagarova N., Tuyakayeva A.* Architecture of high-rise buildings as a brand of the modern Kazakhstan // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301009. EDN VBCMGM.
15. *Moor V.K., Erysheva E.A.* High-rise buildings in the structure of an urbanized landscape and their influence on the spatial composition and image of the city // *E3S Web of Conferences*. 2018. P. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301011. EDN LCQHQE.
16. *Liu X., Niu N., Liu X., Jin H., Ou J., Jiao L. et al.* Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data // *International Journal of Geographical Information Science*. 2017. DOI: 10.1080/13658816.2017.1410549
17. *Александрова А.В.* Принципы формирования многофункциональных территорий и комплексов // *Молодой ученый*. 2021. № 24 (366). С. 63–65. EDN POLVEC.
18. *Добрышева Н.К.* Генеральное проектирование многофункциональных объектов // *Вестник науки*. 2020. Т. 4. № 3 (24). С. 25–28. EDN BXJDHN.

Поступила в редакцию 8 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 2 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Леонидовна Банцерева** — кандидат архитектуры, профессор, доцент кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3395-8895, РИНЦ ID: 641432, Scopus: 57194440733, ORCID: 0000-0003-0931-7285; Olga.bancerova@gmail.com;

Маргарита Игоревна Иванова — аспирант кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 58476556600, ORCID: 0000-0003-1690-2503; margo.ivanova2010@yandex.ru.

Вклад авторов:

Банцерева О.Л. — научное редактирование текста.

Иванова М.И. — идея, сбор материала, написание статьи, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In the context of constantly growing human needs in modern society, the service sector is developing, which is implemented through a network of commercial, cultural and educational institutions, public catering, consumer services, education and childcare, medical services, and transport.

The types of public buildings and structures have developed in a historical context. Their appearance and functional purpose have changed, and their number has increased. Some types have ancient prototypes that originated in Ancient Rome and Ancient Greece; others emerged in later times, marked by the Middle Ages and the Renaissance; still others appeared in our time. The evolutionary transformation of public buildings leads to the emergence of new types and forms of public buildings in the future.

MATERIALS AND METHODS

The article uses historical-legal, comparative-analytical, and systematic approaches to study the process of forming regulatory documents in the field of construction and architecture. The study is based on an analysis of historical sources, regulatory and technical documentation, scientific publications and other regulatory documents from various historical periods, as well as a comparative analysis of existing multifunctional public complexes located in the largest cities of the Russian Federation.

The set of methods used made it possible to comprehensively examine the process of developing regulatory documents in construction and architecture, identify the main patterns of their development, and offer recommendations for improving legal regulation in this area.

RESULTS

A comparative analysis has shown that many public buildings, in the course of historical development, while retaining all or part of their functional purpose, have been transformed into new types, undergoing continuous quali-

tative changes and sometimes becoming dissimilar or only slightly similar to their prototypes [1, 2]. For example, monastery complexes or madrasas, in addition to their main religious purpose, played the role of educational centres. The education of children in Rus and the emergence of school education began in 859 after the adoption of Christianity. The first educational institutions were located at monasteries in Novgorod, Suzdal, Smolensk, and Kursk. At the beginning of the 15th century, monasteries were replaced by private schools called “Masters of Literacy”, which marked a new stage in the development of educational institutions [3–6]. Schools appeared as a new type of public building. Another example concerns trade. In medieval cities, trade was usually carried out in shops on the ground floor of residential buildings. These architectural and planning structures were the original model for modern commercial establishments (shops, supermarkets). Of course, there is a big difference between the architecture of a modern shop and a medieval merchant’s building with a shop on the ground floor, living quarters on the first floor and a warehouse on the second floor, but both types of buildings performed and still perform commercial functions.

At the same time, many types of public buildings, such as modern theatres, art galleries, circuses and stadiums, have retained much in common with their ancient and medieval prototypes. In the theatre, such spectacular and demonstrative spatial planning elements as the stage, proscenium, boxes and rows of seats; in the circus, the arena have retained their original functional purpose and general appearance since the days of Ancient Rome (Fig. 1).

Let us trace the evolutionary transformations of public buildings by analyzing the history of the emergence and improvement of regulatory documents in the field of construction in Russia, as well as studying the periods when new functions of public buildings appeared. We examined regulatory documents, starting with the first building regulations and ending with the latest editions of the CP for the design of public buildings. As a result of the study, the following conclusions were made, char-



a



b

Fig. 1. Amphitheatre in Pamukkale, Hierapolis, Turkey, 200 BC (a); National Centre for the Performing Arts, Beijing, China, 2007, architect Paul Andreu (b)

acterizing the development of regulatory requirements for the design of public buildings (Fig. 2, 3).

1. Until 1737, construction was not considered a separate, clearly structured industry in the Russian Empire. It was only with the introduction of the first building regulations, such as the “Position of Architectural Expedition”, that an independent sphere began to emerge, focused on streamlining the design and construction of buildings. This contributed to the formation of construction as a separate industries^{1, 2, 3}.

¹ Complete Collection of Laws of the Russian Empire. First Collection. Vol. I. 1649–1825. In 45 volumes, edited by M.M. Speransky. Printed by the Second Department of His Imperial Majesty's Own Chancellery, 1830.

² Architectural Archive 1, edited by D. Arkin (editor-in-chief), N. Brunov, I. Mats, D. Sukhov, A. Shchusev. Moscow, Publishing House of the Academy of Architecture of the USSR, 1946; 144.

³ Building Regulations, amended in 1876 and 1879, with explanations of the decisions of the Criminal Cassation Department of the Governing Senate and an appendix of circulars from the Ministry of Internal Affairs and subsequent legal acts. Third edition. St. Petersburg, Printing House of K.K. Retger, 1881.

2. Until the beginning of the 20th century, religious buildings played a significant role in construction. Separate chapters were devoted to them in regulatory documents, emphasizing their importance. However, in the USSR, this function was excluded from building regulations, reflecting changes in state policy. With the return to this issue in 1989, in SNiP 2.08.02–89* “Public Buildings and Structures”, premises for religious ceremonies were included in the list of cultural and leisure facilities, but without being singled out in a separate section^{3, 4}.

3. In the “Urochnaya Ulozheniya” (Code of Laws) published by Nicholas I, buildings were classified not according to their functional purpose, but according to how they were financed. Facilities were divided into state, religious and public buildings depending on their sources of funding, reflecting the peculiarities of construction project management at that time.

4. Until the mid-20th century, all aspects of construction, from building materials and design to estimates and acceptance rules, were regulated within a single document. The introduction of SNiP in the USSR in

⁴ SNiP 2.08.02–89*. Public buildings and structures.



Fig. 2. Title pages of regulatory documents: a — Building Regulations, amended in 1876 and 1879; b — 1933 OST 4488 “Uniform Standards for Building Design. Public Buildings”; c — SNiP. Part II “Construction Design Standards 1954”; d — SNiP II-L.2–62 “Public Buildings and Structures. Basic Design Provisions”; e — SNiP II-L.2–72 “Public Buildings and Structures. Design Standards”; f — SNiP 2.08.02–89* “Public Buildings and Structures”; g — SNiP 31-06–2009 “Building Standards and Rules of the Russian Federation. Public buildings and structures”; h — CP 118.13330.2022 “Public buildings and structures”

1954 marked the beginning of the creation of a more differentiated system of regulatory acts, divided into key areas^{1, 3, 4}.

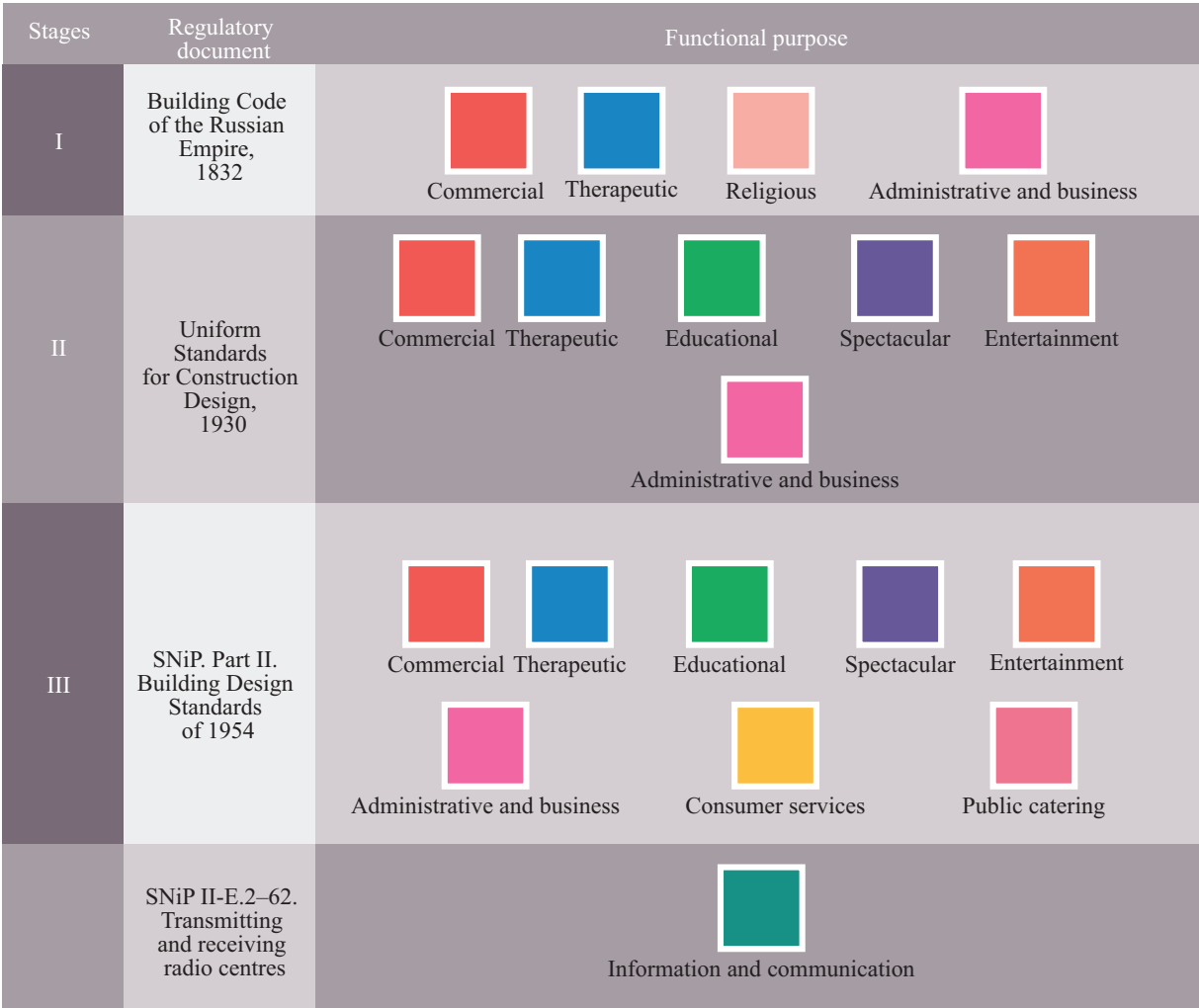
5. Until 1972, the list of public buildings in regulatory documents was a list of specific facilities, such as schools, hospitals, or theatres. Only later was a classification of buildings into functional groups introduced, which made it possible to streamline the approach to design and construction, taking into account their purpose^{5, 6, 7, 8}.

6. The appearance of multifunctional facilities as a separate group in SNiP 2.08.02–85 “Public Buildings and Structures” was an important milestone in the development of public buildings⁹. These buildings, which combine various functions, are now classified as a separate functional-typological group, which indicates

a growing need for universal facilities that meet a wide range of public needs [7–18].

Based on a review of the historical development of regulatory documents in the field of construction in Russia, several stages can be identified that characterize the emergence of new functions of public buildings in the course of historical development (Fig. 3):

- I. The creation of the first structuring of public building functions: commercial, medical, religious, administrative and business.
- II. Addition of educational, entertainment and recreational functions to the list.
- III. Addition of public catering and service functions to the list.
- IV. Separation of the information and communication function into a separate type; addition of the sports function to the list.
- V. Classification of public functions; inclusion of the information and communication function in the composition of public buildings; addition of residential (temporary stay), cultural and educational, transport and recreational functions to the list.
- VI. Separation of multifunctional facilities into a separate type.



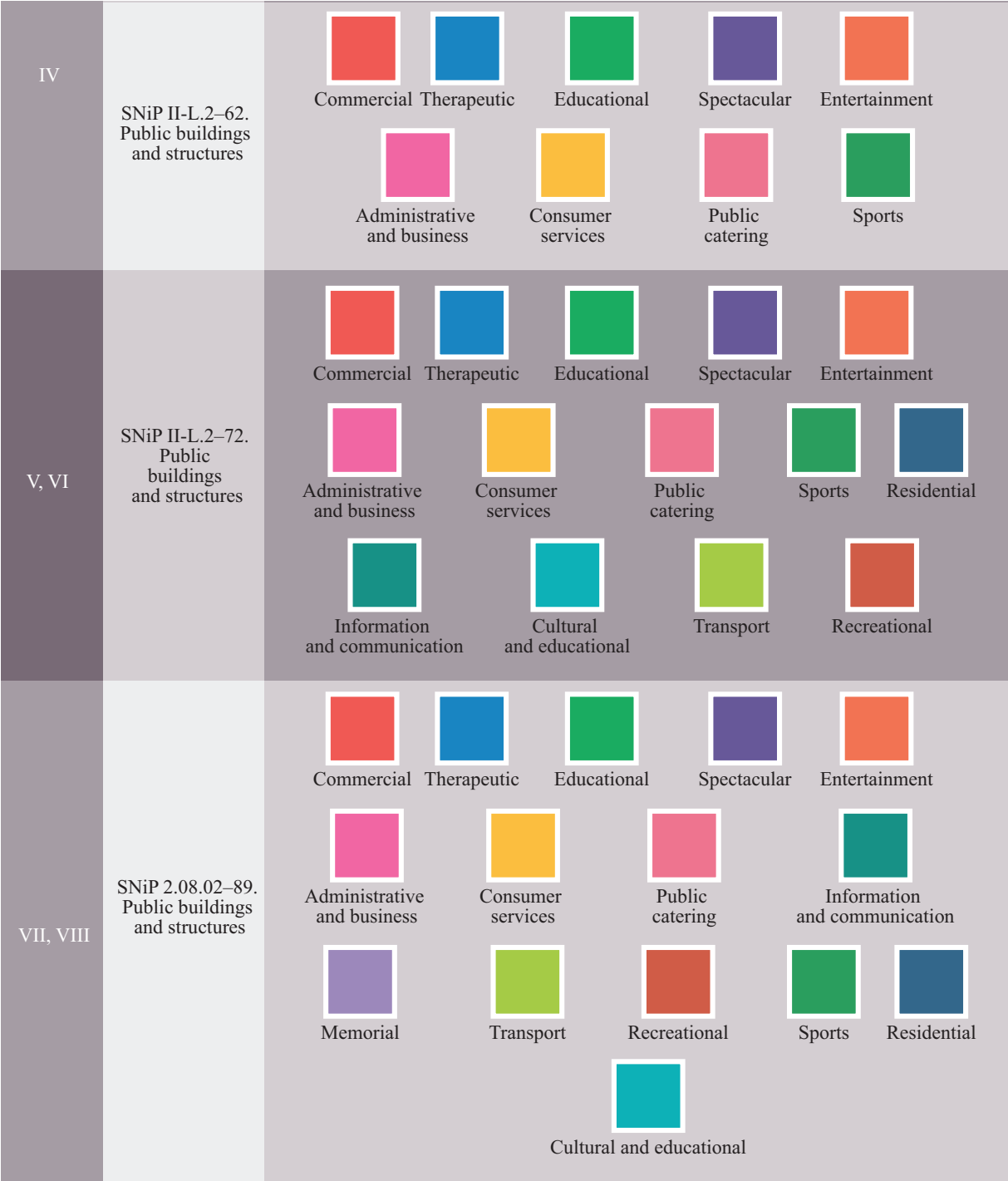


Fig. 3. Stages characterizing the emergence of new functions of public buildings, as reflected in regulatory documents^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14}

⁹ SNiP 2.08.02-85. Public buildings and structures.
¹⁰ CP 160.1325800.2014. Multifunctional buildings and complexes.
¹¹ SNiP 31-06-2009. Building codes and regulations of the Russian Federation. Public buildings and structures.
¹² SNiP II-E.2-62. Transmitting and receiving radio centres. Design standards.
¹³ CP 118.13330.2012. Public buildings and structures.
¹⁴ CP 118.13330.2022. Public buildings and structures.

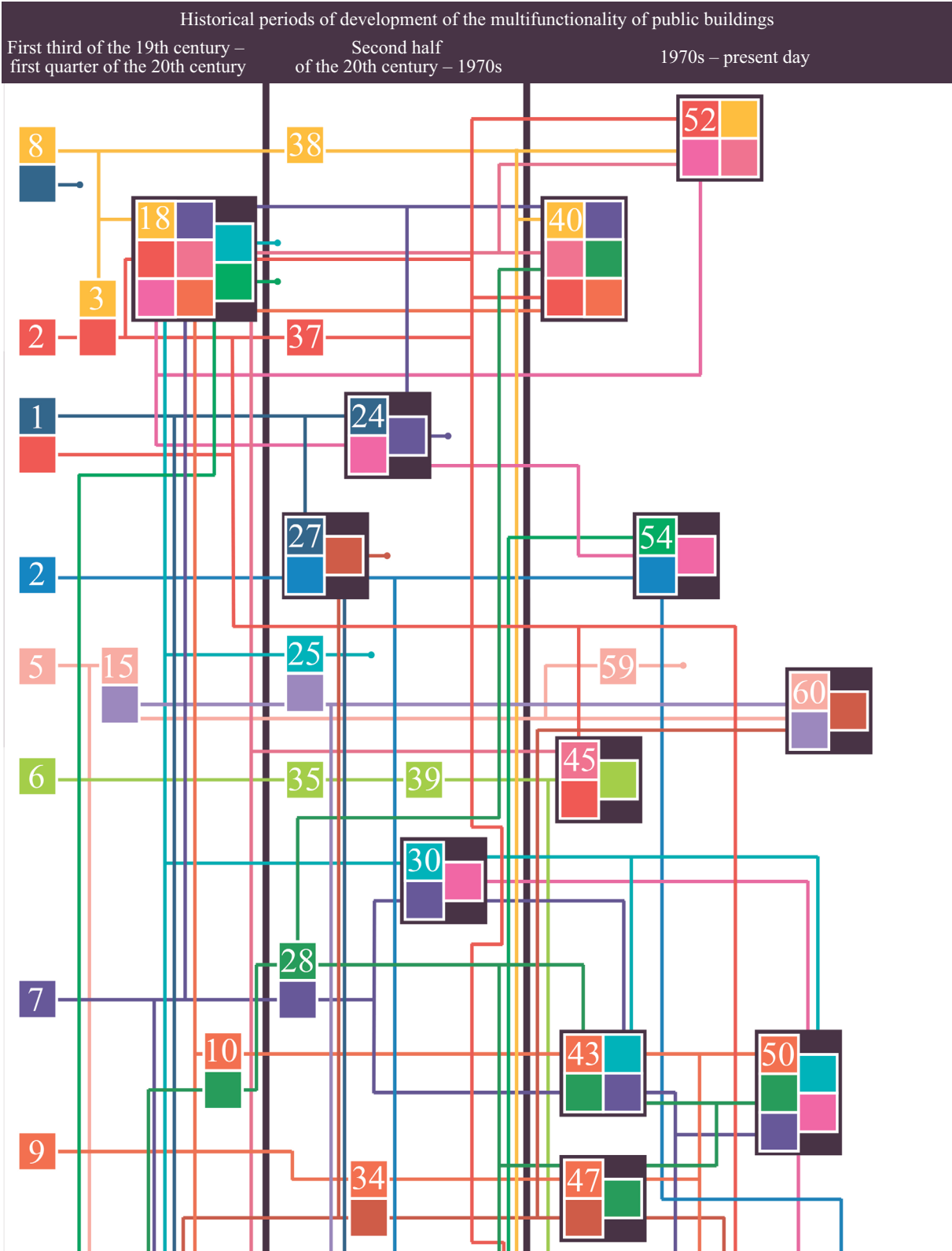
VII. Division of public facilities into groups, addition of memorial function to the list of public functions.
VIII. Identification of multifunctional public complexes (MPC) as a separate group¹⁰.
As a result of examining 60 MPC facilities, a “tree” of the dynamics of combining functional components, “Evolutionary transformations of the functional purpose of public buildings” (Fig. 3, 4), is presented. Based on these diagrams, it is possible to identify

the functional and planning components that influence the formation of MPC (Table 1).

Since a multifunctional building is a building that includes two or more functional planning components interconnected by means of planning techniques, it is proposed to identify the *complex-forming* functional planning components that occupy a dominant position

in terms of area and architectural planning organization, and *additional* functional planning components that occupy a marginal position in terms of area and architectural planning organization.

Thus, the above-mentioned functional and planning components are divided into two groups: complex-forming and additional. Complex-forming components



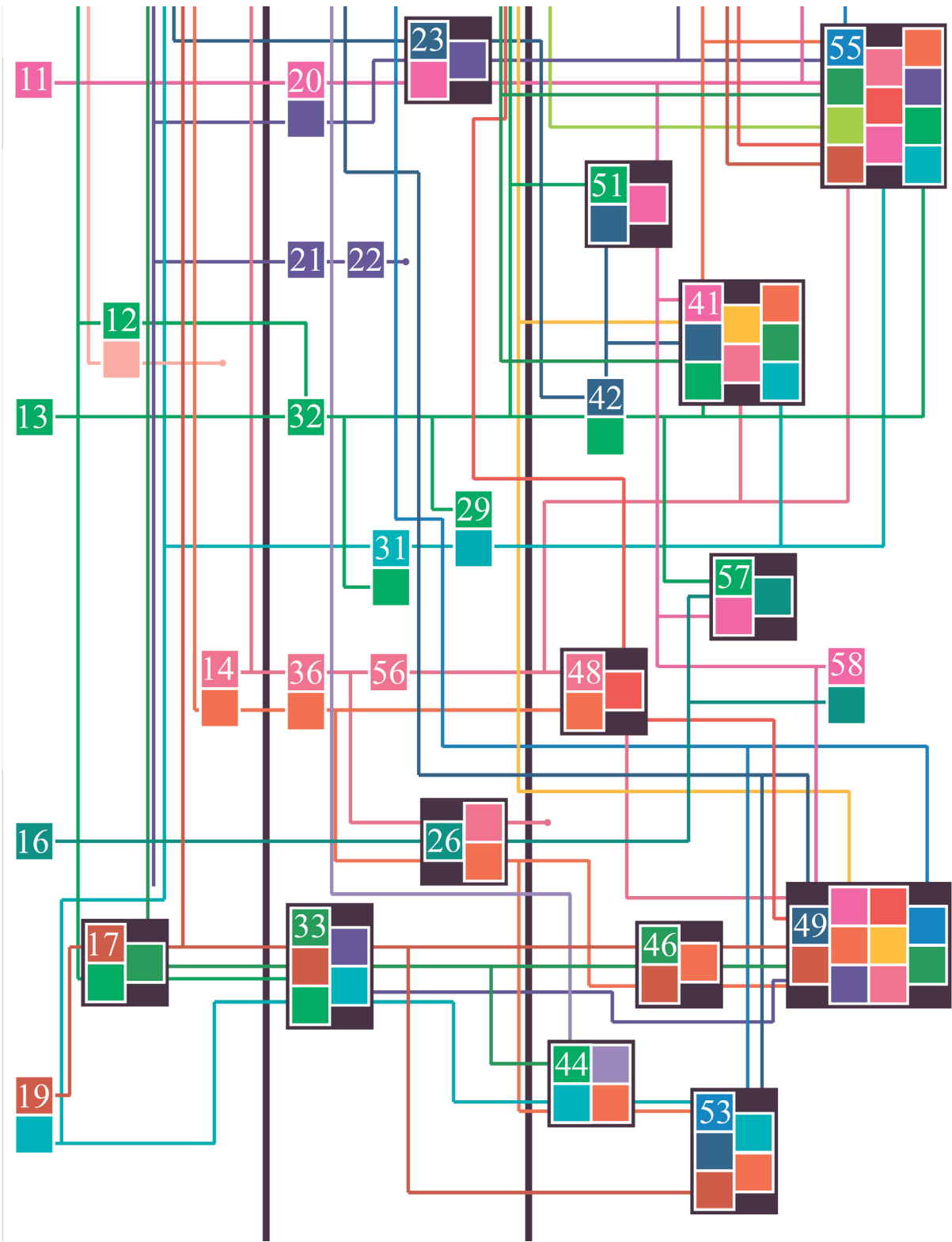


Fig. 4. “Tree” of the dynamics of combining functional components

Table 1. Evolutionary transformations in the functional composition of multifunctional public buildings

Functional purpose of public buildings	Results of evolutionary transformations of the functional components of public buildings
Commercial	Became a complex-forming function, object No. 40 (Fig. 5).
	Included in the MPC as an accompanying function, objects No. 45, 48, 52 (Fig. 5).
	It became part of the MPC as a complex-forming function, objects No. 49, 55 (Fig. 5)

End of the Table 1

Functional purpose of public buildings	Results of evolutionary transformations of the functional components of public buildings
Medical	Became a complex-forming function, objects No. 49, 54 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, object No. 55 (Fig. 5)
Religious	Preserved as a single object, object No. 59 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, object No. 60 (Fig. 5)
Administrative and business	It became a complex-forming function, object No. 52 (Fig. 5). It became part of the MPC as an accompanying function, objects No. 41, 49, 50 (Fig. 5). It became part of the MPC as a complex-forming function, objects No. 51, 54, 55, 57 (Fig. 5)
Educational	Became a complex-forming function, objects No. 41, 42 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 51, 55, 57 (Fig. 5)
Spectacular	Included in the MPC as an accompanying function, object No. 49 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 40, 43, 50, 55 (Fig. 5)
Entertainment	Became a complex-forming function, object No. 47 (Fig. 5). Included in the MPC as an accompanying function, objects No. 44, 46, 48, 49, 50 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 40, 43, 55 (Fig. 5)
Public services	Included in the MPC as an ancillary function, objects No. 40, 41, 49, 52 (Fig. 5)
Public catering	Became a complex-forming function, object No. 48 (Fig. 5). Included in the MPC as an ancillary function, objects No. 40, 41, 45, 49, 52, 55 (Fig. 5)
Information and communication	Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 57, 58 (Fig. 5)
Sports	Became a complex-forming function, object No. 50 (Fig. 5). Included in the MPC as an accompanying function, objects No. 40, 41, 46, 47, 49 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 43, 55 (Fig. 5)
Residential	Became a complex-forming function, object No. 49 (Fig. 5). Included in the MPC as an accompanying function, objects No. 41, 42, 51 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, object No. 53 (Fig. 5)
Cultural and educational	Included in the MPC as an accompanying function, objects No. 41, 50, 53 (Fig. 5). Included in the MPC as a complex-forming function, objects No. 43, 55 (Fig. 5)
Transport	Became a complex-forming function, object No. 45 (Fig. 5). Included in the MPC as an accompanying function, object No. 55 (Fig. 5)
Recreational	Became a complex-forming function, objects No. 46, 53 (Fig. 5). Included in the MPC as an ancillary function, objects No. 47, 49, 55 (Fig. 5)
Memorial	Became a complex-forming function, object No. 44 (Fig. 5)

include: commercial, medical, religious, administrative and business, educational, entertainment, recreational, information and communication, sports, residential, cultural and educational, transport, recreational, and memorial. Additional components include public services and public catering.

At the same time, among the complex-forming functional and planning components, subtypes are distinguished: dominant, symbiotic, and subject-specific (Table 2). Symbiotic components are those that form

a complex when combined with others. Subject-specific components are those that form a complex with a predominant share of monofunction.

The main functional and planning components include commercial, administrative and business, residential, recreational and memorial. However, due to the specific requirements of territorial placement in the urban architectural environment and the peculiarities of functional orientation, the recreational and memorial functions claim to exist independently, as demonstrated by

Table 2. Types of functional and planning components of multifunctional public complexes

Additional functional and planning components	Complex-forming functional and planning components		
	Predominant	Symbiosis	Subject-specific
Public services	Commercial	Religious	Medical
Public catering	Administrative and business	Spectacular	Educational
–	Residential	Information and communication	Entertainment
–	Recreational	Cultural and educational	Sports
–	Memorial	–	Transport

become dissimilar or only slightly similar to their prototypes.

Based on a review of the historical development of regulatory documents in the field of construction in Russia, several stages have been identified that characterize the emergence of new functions of public buildings in the course of historical development. It is noted that the identification of multifunctional public complexes and the appearance in SNiP 2.08.02–85 “Public

A comparative analysis has shown that many public buildings, while retaining all or part of their functional purpose, have evolved into new types, undergone continuous qualitative transformation, and sometimes





Fig. 5. Analysis of existing MPC by functional and planning components: *a* — Aviapark Shopping and Entertainment Centre, Moscow, Russia, 2014, architect Callison; *b* — Olympic Park, Sochi, Russia, 2014, architect Populous, Mosproekt-4, Botta Management Group, Ingeokom Association CJSC, Mostovik NGO; *c* — Nizhegorodskaya Transport Hub, Moscow, Russia, 2020, architects: ABTB, KNIPI Moscow Master Plan, OJSC MKZD, Mosproekt-3, ARTEZA; *d* — Dream Island Amusement Park, Moscow, Russia, 2020, architects: Cunningham Architects, Chapman Taylor, Land Milano; *e* — Depo. Moscow Food Mall, Moscow, Russia, 2019, architects: Mikhail Gleyng, Nikolai Zhukov; *f* — Sirius Innovation Science and Technology Centre (INSC), Sochi, Russia; *g* — Mriya Resort & Spa, Yalta, Russia, 2014, architects Norman Foster; *h* — Lakhta Centre, Saint Petersburg, Russia, 2021, architects Tony Kettle, RMJM, Gorproekt; *i* — Lomonosov Moscow Innovation Cluster, Moscow, Russia, 2023, architect KAMEN; *j* — Patriot Central Military-Patriotic Park of the Armed Forces of the Russian Federation, Kubinka, Russia, 2014

Buildings and Structures” of multifunctional facilities as an independent group became an important milestone in the development of public buildings. These buildings, which combine various functions, are now classified as a separate functional-typological group, which indicates a growing need for universal facilities that meet a wide range of public needs.

It has been established that the functional and planning components in a multifunctional building are divided into complex-forming (among which the domi-

nant, symbiotic and subject-specific components stand out) and additional components.

As a result of examining more than 60 MPC facilities, a “tree” of the dynamics of combining functional components is presented. Complex-forming functional and planning components include components that occupy a dominant position in terms of area and architectural and planning organization. The dominant functional and planning components include commercial, administrative and business, and residential.

REFERENCES

1. Bantserova O., Ivanova M. Primary Methods of Forming the Adaptation of Architectural Multifunctional Public Objects. *Civil Engineering and Architecture*. 2023; 11(5):2310-2320. DOI: 10.13189/cea.2023.110505
2. Abramova M., Kurochkina T. Normative and technical documentation: from origins to modernity. *Housing Construction*. 2012; 12:37-38. EDN PVPHHT. (rus.).
3. Maloyan G.A. *Fundamentals of urban planning : textbook*. Moscow, Publishing House of the Association of Construction Universities, 2004; 120. (rus.).
4. Zeidler B. *Multifunctional architecture*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 151. (rus.).
5. Bantserova O.L., Ivanova M.I. To the issue of transformation of multifunctional public of multifunctional public complexes in the process of historical development in connection with socio economic changes in society. *System Technologies*. 2024; 2(51):113-126. DOI: 10.48612/dniti/2024_51_113-126. EDN QQVAMU. (rus.).
6. Schmidt III R., Austin S. *Adaptable Architecture: theory and practice*. New York, Routledge. 2016. DOI: 10.4324/9781315722931
7. Taimurzina E.A. Multifunctional buildings and complexes. *Actual Researches*. 2022; 22(101):35-37. EDN SYWPCP. (rus.).
8. Haldane J. Architecture, philosophy and the public world. *British Journal of Aesthetics*. 1990; 30(3):203. EDN IPMFYP.
9. Volchok Y. The Notion of “high” and commitment to excellence in contemporary Russian architecture. History and project: Looking into future. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301015. EDN UYLEGR.
10. Gagulina O., Matovnikov S. Spatially organized vertical city as a synthesis of tall buildings and airships. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301002. EDN XXQFHF.
11. Schuilenburg M., Peeters R. Smart cities and the architecture of security: pastoral power and the scripted design of public space. *City, Territory and Architecture*. 2018; 5(1):1-9. DOI: 10.1186/s40410-018-0090-8. EDN QUNCIC.
12. Pershina A., Radzhabov M., Dormidontova T. The problems and perspectives for the introduction of high-rise construction in Russian cities. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301014. EDN YVWFCD.
13. Generalov V.P., Generalova E.M., Kalinkina N.A., Zhdanova I.V. Typological diversity of tall buildings and complexes in relation to their functional structure. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301020. EDN YVWDSO.
14. Abdrasilova G., Kozbagarova N., Tuyakayeva A. Architecture of high-rise buildings as a brand of the modern Kazakhstan. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301009. EDN VBCMGM.
15. Moor V.K., Erysheva E.A. High-rise buildings in the structure of an urbanized landscape and their influence on the spatial composition and image of the city. *E3S Web of Conferences*. 2018; 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301011. EDN LCQHQE.
16. Liu X., Niu N., Liu X., Jin H., Ou J., Jiao L. et al. Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data. *International Journal of Geographical Information Science*. 2017. DOI: 10.1080/13658816.2017.1410549
17. Aleksandrova A.V. Principles of formation of multifunctional territories and complexes. *Young Scientist*. 2021; 24(366):63-65. EDN POLVEC. (rus.).
18. Dobrysheva N.K. General design of multifunctional objects. *Science Bulletin*. 2020; 4(3):(24):25-28. EDN BXJDHH. (rus.).

Received February 8, 2025.

Adopted in revised form on March 19, 2025.

Approved for publication on April 2, 2025.

BIONOTES: **Olga L. Bantserova** — Candidate of Architecture, Professor, Associate Professor of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3395-8895, ID RSCI: 641432, Scopus: 57194440733, ORCID: 0000-0003-0931-7285; Olga.bancerova@gmail.com;

Margarita I. Ivanova — postgraduate student of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 58476556600, ORCID: 0000-0003-1690-2503; margo.ivanova2010@yandex.ru.

Authors' contribution:

Olga L. Bantserova — scientific editing of the text.

Margarita I. Ivanova — idea, material collection, article writing, material processing.

The authors declare that they have no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 725.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.7

Архитектура паллиативных учреждений стран Африки

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

Введение. Предпринята попытка охарактеризовать текущее состояние паллиативной помощи, выявить особенности и характерные черты в архитектурном проектировании паллиативных учреждений стран Африки. Актуальность исследования связана с необходимостью изучения международного опыта в области архитектурной организации паллиативной помощи в сложной социальной, экономической, логистической и эпидемиологической ситуации.

Материалы и методы. Проанализированы научные статьи на тему архитектурного проектирования паллиативных учреждений в странах Африки, логистических взаимосвязей, социально-экономических и эпидемиологических условий для развития паллиативной помощи, опубликованные в 2008–2024 гг., представленные на порталах eLibrary, Scopus, PubMed, Web of Science.

Результаты. Представлена краткая история развития паллиативной помощи на Африканском континенте. Выявлены основные сложности на пути развития этой сферы. Приведены характерные черты и особенности формирования архитектурной среды паллиативных учреждений стран Африки, среди них функциональные, стилистические, климатические, культурные, религиозные, социальные, эпидемиологические и экономические. Особенности проектирования паллиативных учреждений в странах Африки демонстрируют, как архитектурные решения становятся инструментом адаптации к уникальным условиям, сохраняя баланс между функциональностью, культурными традициями, эстетикой и гуманностью.

Выводы. Основные архитектурные отличия от мировых аналогов состоят в том, что африканские учреждения чаще строятся с учетом предельной минимизации затрат на строительство и эксплуатацию и максимальным упором на функциональность, гибкость и устойчивость здания. Ограниченные ресурсы смещают акцент с высокотехнологичных решений и наличия специализированных медицинских помещений, принятых в развитых странах, на простоту и устойчивость архитектурных решений, обеспечивающих их эксплуатационную экономичность и долговечность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хосписы Африки, паллиативные центры Африки, архитектура хосписов, архитектура африканских стран, проектирование хосписа, архитектура паллиативных учреждений

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность редакционной коллегии журнала и анонимным рецензентам за уделенное время и оказанное внимание.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ключко А.Р. Архитектура паллиативных учреждений стран Африки // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.7

Автор, ответственный за переписку: Асмик Рубеновна Ключко, KlochkoAR@mgsu.ru.

Architecture of palliative care institutions in Africa

Asmik R. Klochko*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation***ABSTRACT**

Introduction. This study attempts to characterize the current state of palliative care, to identify the features and characteristics in the architectural design of palliative institutions in African countries. The relevance of this paper is related to the need to study international experience in the field of architectural organization of palliative care in a complex social, economic, logistical and epidemiological situation.

Materials and methods. Scientific papers on the architectural design of palliative care facilities in African countries, logistical relationships, socio-economic and epidemiological conditions for the development of palliative care, published in 2008–2024, presented on the portals eLibrary, Scopus, PubMed, Web of Science, were analyzed.

Results. A brief history of the development of palliative care on the African continent is presented. The main difficulties in the development of this area have been identified. The paper presents the characteristic features and peculiarities of the architectural environment of palliative institutions in Africa, including functional, stylistic, climatic, cultural, religious, social, epidemiological and economic. The design features of palliative care facilities in African countries demonstrate how architectural solutions become a tool for adapting to unique conditions, while maintaining a balance between functionality, cultural traditions, aesthetics and humanity.

Conclusions. The main architectural differences from world analogues are that African institutions are more often built with the utmost minimization of construction and operation costs and maximum emphasis on the functionality, flexibility and

sustainability of the building. Limited resources shift the focus from high-tech solutions and the availability of specialized medical facilities, adopted in developed countries, to simplicity and sustainability of architectural solutions that ensure their operational efficiency and durability.

KEYWORDS: hospices of Africa, palliative centres of Africa, hospice architecture, architecture of African countries, hospice design, architecture of palliative institutions

Acknowledgements. The author expresses deep gratitude to the editorial board of the journal and anonymous reviewers for their time and attention.

FOR CITATION: Klochko A.R. Architecture of palliative care institutions in Africa. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):7. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.7

Corresponding author: Asmik R. Klochko, KlochkoAR@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Паллиативная помощь в развитых странах стремительно эволюционирует, но в странах Африки, где этот вид помощи катастрофически необходим, он все еще находится в зачаточном состоянии [1]. Социальные условия в сфере организации паллиативной помощи в странах Африки отражают многочисленные проблемы, связанные с ограниченными ресурсами; культурными особенностями региона; отсутствием законов, регулирующих сферу паллиатива; отсутствием необходимой инфраструктуры вплоть до плохой логистики доступа к сельским отдаленным районам; проблемами с электроснабжением и связью; распространением вируса иммунодефицита человека и т.д. [2].

Здесь существует культурный барьер в обсуждении тем смерти и умирания, что делает паллиативную помощь чувствительной темой для обсуждения. В части традиционных сообществ страдания и боль воспринимаются как часть жизненного пути, которую нужно пройти самостоятельно, и это очень сдерживает людей в обращении за помощью. Принято, что в африканских культурах уход за больными и умирающими оказывает семья, но это становится довольно значимой проблемой в условиях бедности.

Сейчас паллиативная помощь интегрирована в национальную систему здравоохранения некоторых африканских стран (например, Уганды, ЮАР,

Кении), и это может стать образцом для других регионов, в которых сеть паллиативной помощи отсутствует. В ряде африканских стран существует ограниченное количество паллиативных центров, сталкивающихся с дефицитом квалифицированного персонала. Так, даже в относительно развитой в вопросах оказания паллиативной помощи Уганде с населением около 50 млн чел. на период начала 2024 г. работало всего несколько сотен сертифицированных специалистов.

Правительства многих африканских стран выделяют ограниченные средства на паллиативную службу, поэтому основными организаторами развития паллиативной помощи оказываются некоммерческие организации, нестабильно финансируемые из международных ассоциаций. Но без скоординированных усилий по развитию и финансированию паллиативной помощи в рамках систем здравоохранения охват остается низким.

Имеющиеся разноформатные паллиативные учреждения не могут вместить большое количество людей одновременно. Сотрудники паллиативной службы вынуждены организовывать выездные службы, возглавляемые медсестрами при поддержке социальных работников, врачей и духовных наставников, часто работающих на добровольных началах. При этом паллиативная помощь остается малодоступной, особенно для жителей отдаленных территорий.



Рис. 1. Отдел паллиативной помощи в больнице «Мать милосердия» в Гиделе (Судан) — единственная больница в радиусе 500 км обслуживает более миллиона человек

Помещения, в которых оказывается паллиативная помощь, чаще всего не предназначены специально для этой функции, располагаются в структуре больниц (рис. 1), церквях, частных домах и в других однофункциональных переоборудованных пространствах, статичных по своей структуре и не способных адаптироваться к каким-то изменениям [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы и методы данного исследования предусматривают анализ публикаций по тематике архитектурного проектирования хосписов на территории Африки, логистических взаимосвязей, социально-экономических и эпидемиологических условий для развития паллиативной помощи, опубликованных в 2008–2024 гг., представленных на порталах eLibrary, Scopus, PubMed, Web of Science. Также применяется междисциплинарный подход, учитывающий влияние культурных, медицинских, демографических, социологических, управленческих аспектов на архитектурное проектирование хосписов на территории африканских стран.

История развития паллиативной помощи в Африке берет свое начало с Зимбабве, где в 1979 г. был основан первый хоспис «Остров» (Island) (рис. 2). Первоначальными целями стали оказание прямой паллиативной помощи на дому тем, у кого выявлены болезни, угрожающие жизни, а также обслуживание членов семей в связи с тяжелой утратой.

Хоспис «Остров» основала Морин Баттерфилд, чья дочь умерла от рака шейки матки в 1977 г. В 1979 г. во время поездки в Англию Морин узнала о зарождающемся хосписном движении, посетила симпозиум в Университете WITS в Йоханнесбурге, чтобы послушать выступление Сесили Сондерс [4–11], в 1967 г. основавшей первый современный хоспис в Лондоне, где оказывалась высококачественная паллиативная помощь. Вернувшись домой в Зимбабве, Морин организовала новую службу в Хараре. Island — это аббревиатура с английского, расшифровывается и переводится как «интегрированная, значимая жизнь и смерть». В 2014 г. компания расширила номенклатуру услуг и сменила название на Island Hospice & Healthcare. Сегодня этот хоспис управляет четырьмя филиалами по стране, сотрудничает с Министерством здравоохранения и социального обеспечения детей, чтобы интегрировать паллиативную помощь в систему здравоохранения и обеспечить ее получение всеми жителями Зимбабве, которые нуждаются в ней [12].

В Южной Африке услуги паллиативной помощи появились в негосударственном секторе в 1980-х гг., когда были созданы первые хосписы для пациентов с онкологическими заболеваниями и ВИЧ. Но эти учреждения оказались доступны только состоятельным гражданам [13].

Значимой в сфере паллиатива для африканских стран является компания Hospice Africa, основан-



Рис. 2. Хоспис «Остров» в Хараре, Зимбабве¹

¹ Island Hospice & Healthcare. URL: <https://www.findhealthclinics.com/ZW/Harare/261496887279618/Island-Hospice-%26-Healthcare#:~:text=Island%20Hospice%20Service%20Zimbabwe%20was,and%20a%20comprehensive%20bereavement%20service>

ная в 1992 г. в Ливерпуле (Великобритания), позже расширившая свои клинические и вспомогательные операции по всему миру. Открыв штаб-квартиру в Уганде, она разработала доступную и соответствующую культурным традициям Африки модель паллиативной помощи, которая тиражируется во всей Африке. Клинические бригады ежедневно оказывают пациентам комплексную паллиативную помощь в клинике или на дому. Также оказывается работа с партнерскими организациями во многих странах Африки, чтобы продвигать паллиативную помощь на континенте.

С 2000 г. паллиативная помощь стала развиваться по всему континенту. К 2016 г. в восьми африканских странах разработаны национальные программы паллиативной помощи [14]. К 2017 г. в 50 % африканских учреждений здравоохранения были штатные сотрудники, отвечающие за паллиативную помощь². К 2020 г. во многих больницах и учебных заведениях Африки созданы отделения хосписов и паллиативной помощи, в общей сложности 1085 служб паллиативной помощи, несмотря на экономические трудности и пандемию COVID-19 [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно утверждать, что на сегодняшний день в африканских странах система паллиативной службы активно развивается, в своих проявлениях она разноформатна, зависима от многочисленных факторов, поскольку адаптируется к условиям региона, социально-экономическим реалиям, ограниченным ресурсам, уровню развития инфраструктуры и культурным особенностям.

Приведем характерные черты и особенности формирования архитектурной среды паллиативных учреждений стран Африки.

Функциональные особенности архитектурных решений

Несмотря на то что в настоящее время преобладает подход к лечению, ориентированный на пребывании в медицинских учреждениях, более популярным вариантом в Африке является лечение на дому. Пациенты с онкологией, ВИЧ, терминальной стадией почечной недостаточности, прогрессирующими неврологическими расстройствами и туберкулезом, особенно лекарственно-устойчивым, предпочитают получать паллиативную помощь выездными бригадами на дому. Поэтому большинство современных учреждений паллиативной помощи в Африке сочетают стационарное лечение, зоны дневного ухода и отделение ухода на дому, что важно в сложных логистических условиях и обеспечивает поддержку пациентам с разным уровнем потребностей.

² APCA Atlas of Palliative Care in Africa // African Palliative Care Association. 2017. URL: <https://africanpalliativecare.org/resource-center/apca-atlas-palliative-care-africa>

В структуре паллиативного учреждения акцентируется внимание на наличии специальных зон и помещений социальной и психологической поддержки населения.

Важной функциональной особенностью паллиативных учреждений и хосписов африканских стран служит внедрение помещений, обеспечивающих образовательную функцию, где организовывается обучение медсестер, волонтеров и членов семьи базовым навыкам ухода за тяжелобольными. Например, хоспис «Африка Уганда» [16, 17], пионер и лидер в области паллиативной помощи в Африке с момента своего основания в 1993 г., сочетает медицинские услуги с широкой программой обучения местного персонала, что помогает расширять доступ к помощи по всей стране.

Пространства современных паллиативных учреждений африканских стран проектируются с учетом возможности их трансформации и адаптации под другие функции. Например, залы могут использоваться как для терапии, так и для образовательных или развлекательных мероприятий. Это со своей стороны позволяет минимизировать затраты на строительство и эксплуатацию здания в условиях ограниченных ресурсов.

Особое внимание уделяется функциональной простоте санитарного и хозяйственного обслуживания. Помещения для приготовления пищи, санитарной обработки, постирочные и другие проектируются компактно, по упрощенным функциональным связям без сложных логистических путей и ответвлений.

Здания паллиативных учреждений строятся в основном одноэтажными, без сложных коммуникаций (рис. 3).

Стилистические особенности архитектурных решений

Архитектурные проекты традиционно выполняются из местных строительных материалов, таких как глиняный кирпич, сырцовый кирпич, солома, древесина, уголь, мел, что в условиях ограниченного финансирования делает здания экономичными, а также экологичными и гармонично интегрированными в окружающую среду. Взаимосвязь здания с природой, украшение этническими мотивами и узорами придает ему композиционное разнообразие и играет культурную и терапевтическую роль, позволяющую пациентам и их близким находить утешение в естественной привычной среде (рис. 4).

Климатические особенности, влияющие на архитектурные решения

В архитектурных проектах паллиативных учреждений стран Африки активно используются архитектурные решения, обеспечивающие комфорт без использования дорогостоящих технологий. Например, решения учитывают сложные климатические

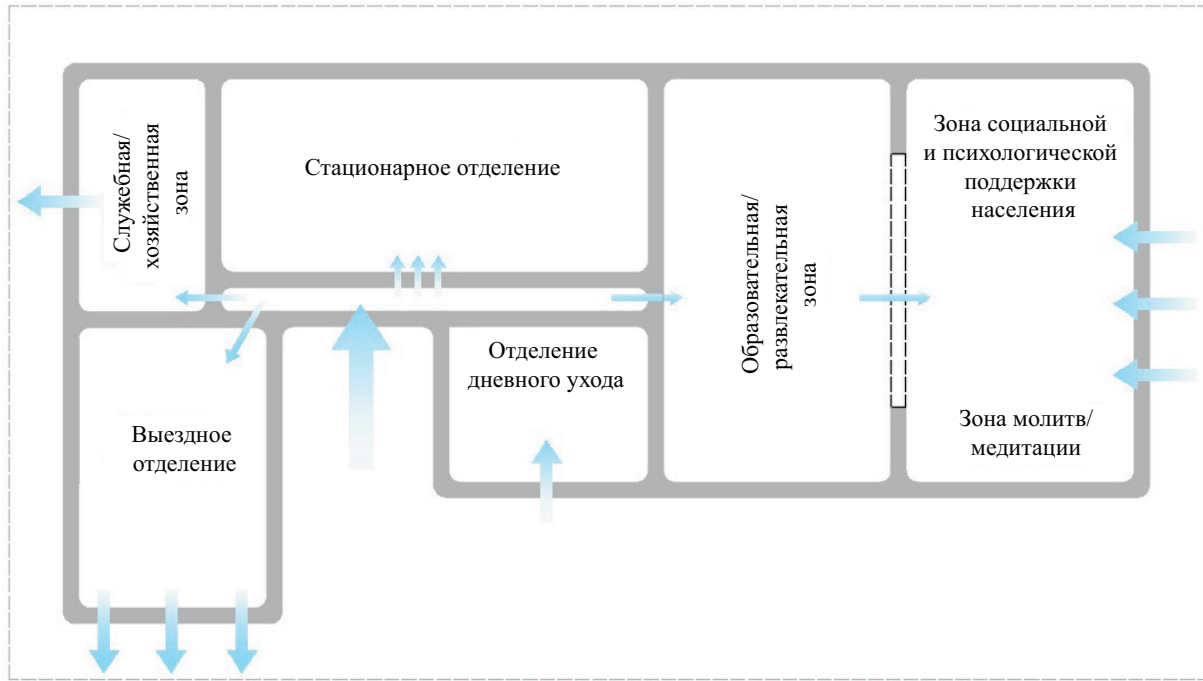


Рис. 3. Пример функциональной схемы паллиативного учреждения африканских стран

ские условия внедрением в структуру проекта широких навесов, созданием зеленых терапевтических зон, открытых затененных пространств (террас, внутренних дворов, галерей), улучшающих микроклимат внутри здания. Тепловая масса утрамбованной земли, примененной в конструкции наружных стен,

позволяет регулировать микроклимат помещений; методы естественной вентиляции минимизируют их перегрев. Естественное освещение интенсивно используется для сокращения энергозатрат. В зонах жаркого и сухого климата размеры проемов минимизируют, с максимально освещаемой стороны вы-



a



b



c



d



Рис. 4. Применение местных материалов и этнических мотивов в архитектуре стран Африки³: *a* — Нубия; *b* — Южно-Африканская Республика; *c* — Нигерия; *d* — Гана; *e* — Марокко; *f* — Уганда

страивают глухие стены. В зонах влажных тропиков расширяют проемы для усиления проветривания.

Культурные и религиозные особенности, влияющие на архитектурные решения
Во многих африканских странах паллиативная помощь работает в связке с культурными обычаями и религиозными традициями, что помогает легче адаптировать население к такой форме помощи и принять лечение. Общественные зоны и помещения проектируются достаточно обширными, позволяющими вмещать многолюдные коллективы, поддерживая коллективный дух африканских сообществ. Обязательное наличие комнат для собра-

ний, внутренних дворов, залов для проведения мероприятий обеспечивают условия взаимодействия пациентов с близкими. Обязательные зоны для медитаций и молитв обычно оснащаются элементами традиционной африканской символики.

Социальные и эпидемиологические особенности, влияющие на архитектурные решения
Глобальная эпидемия ВИЧ для африканских стран находится в катастрофическом состоянии — примерно 1/5 часть взрослого населения заражена этим вирусом. Именно поэтому многие африканские паллиативные учреждения адаптированы именно к борьбе с ВИЧ/СПИД и отличаются по своей

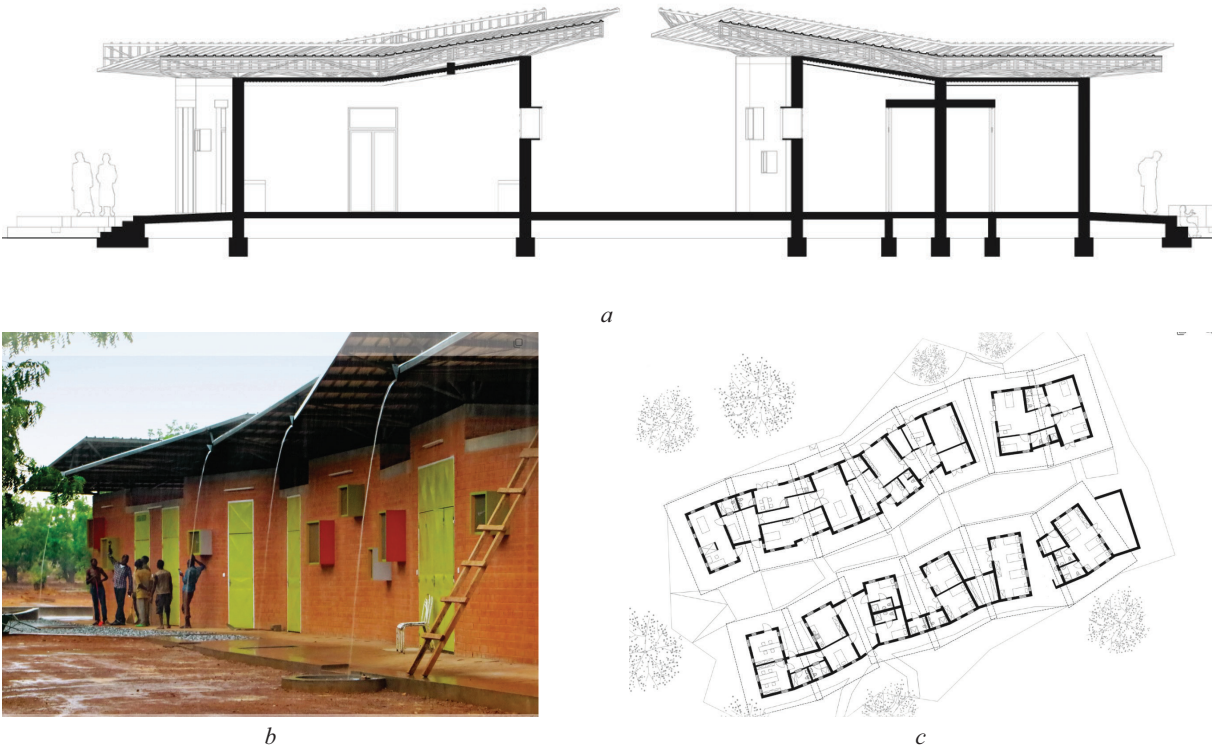


Рис. 5. Модульные решения на примере медицинского центра, г. Лео, Буркина-Фасо, архитектор Диебедо Фрэнсис Кере, 2017 г.

³ Surgical and Health Center, Léo. URL: <https://arquitecturaviva.com/works/surgical-and-health-center-in-leo#>

функциональной организации и архитектурным решениям. Чаще всего они представляют собой групповые резиденции или жилые дома на несколько инфицированных человек, предоставляющих от 4 до 50 койко-мест с расширенным уходом, круглосуточной поддержкой и консультациями. В крупных городах существует также ряд хосписов с более традиционной программой. Но все же в африканских странах понятие «хоспис» в силу плачевной ситуации с распространением вируса иммунодефицита человека определяется более широко, отражая всю серьезность кризиса.

Экономические особенности, влияющие на архитектурные решения

Практически вся архитектурная деятельность в африканских странах сталкивается с крайней нехваткой средств и сложностями финансирования, что приводит к необходимости ставить вопросы минимизации затрат во главу угла. Выше были перечислены особенности, так или иначе касающиеся вопросов экономии средств. Это создание простых функциональных связей и структур, проектирование компактных одноэтажных зданий, применение местных материалов, всесторонний учет клима-

тических особенностей и другое. Также с точки зрения экономичности становятся популярными модульные конструкции [20], которые дают возможность поэтапно строить паллиативные учреждения по мере увеличения финансирования (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности проектирования паллиативных учреждений в странах Африки демонстрируют, как архитектурные решения становятся инструментом адаптации к уникальным условиям, сохраняя баланс между функциональностью, культурными традициями, эстетикой и гуманностью.

Можно резюмировать, что основные архитектурные отличия от мировых аналогов состоят в том, что африканские учреждения чаще строятся с учетом предельной минимизации затрат на строительство и эксплуатацию и максимальным упором на функциональность, гибкость и устойчивость здания. Ограниченные ресурсы смещают акцент с высокотехнологичных решений и наличия специализированных медицинских помещений, принятый в развитых странах, на простоту и устойчивость архитектурных решений, обеспечивающих их эксплуатационную экономичность и долговечность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Van der Plas W.Y., Benjamens S., Kruijff Sch.* The increased need for palliative cancer care in Sub-Saharan Africa // *European Journal of Surgical Oncology*. 2020. Vol. 46. Issue 7. Pp. 1373–1376. DOI: 10.1016/j.ejso.2020.03.212. EDN HEYFXK.
2. *Powell R.A., Downing J., Radbruch L., Mwangi-Powell F.N., Harding R.* Advancing palliative care research in Sub-Saharan Africa: from the Venice declaration, to Nairobi and beyond // *Palliative Medicine*. 2008. Vol. 22. Issue 8. Pp. 885–887. 10.1177/0269216308098094
3. *Narot S.* Rethinking the design for palliative care; exploring the concept of multigenerational living in Durban. The School of Built Environment and Development Studies University of KwaZulu-Natal Durban, South Africa, 2019. URL: <https://core.ac.uk/download/304374386.pdf>
4. *Клочко А.Р., Ясенецкая И.Г.* Современные тенденции в архитектурном проектировании хосписов // *Строительство: наука и образование*. 2020. Т. 10. № 2. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.2. EDN GCRCTJ.
5. *Фигерас Ж., Макки М., Моссиалос Э., Солтман Р.Б.* Реформа больниц в новой Европе / пер. с англ. М. : Весь мир, 2002. 320 с.
6. *Adams A.* Home and/or Hospital: The Architectures of End-of-Life Care // *Change Over Time*. 2016. Vol. 6. Issue 2. Pp. 248–263. DOI: 10.1353/cot.2016.0015
7. *Ahuja N.* End Stages // *Places Journal*. 2018. DOI: 10.22269/180515
8. *Громова А.С., Литвинова О.Г.* Проектирование хосписов в концепции салютогенеза // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 2. С. 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-9-23. EDN YHZQHC.
9. *Клочко А.* Хосписы в инфраструктуре городов РФ // *Проект Байкал*. 2021. Т. 18. № 70. С. 162–168. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1908. EDN CTUQER.
10. *Klochko A.R.* Trends in the Design of Hospices and Palliative Centers in the Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 988. P. 052068. DOI: 10.1088/1755-1315/988/5/052068
11. *Kotgirwar Y.* Trends in Hospice Architecture // *Seminar and Technical writing-II* PA 494. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.13285.65763
12. *Zvakawapano W.* I am and I will: remembering how Africa's first hospice was founded 40 years ago // *Ehospice*. 2019. URL: https://ehospice.com/sa_posts/i-am-and-i-will-remembering-how-africas-first-hospice-was-founded-40-years-ago/
13. *Jencks C., Heathcote E.* Architecture and Health // *The Architecture of Hope: Maggie's Cancer Caring Centres*. London : Frances Lincoln, 2015.

14. Luyirika E.B. K., Namisango E., Garanganga E., Monjane L., Ginindza N., Madonsela G. *et al.* Best practices in developing a national palliative care policy in resource limited settings: lessons from five African countries // *Ecancermedicalscience*. 2016. Vol. 10. DOI: 10.3332/ecancer.2016.652

15. Connor S. *Global Atlas of Palliative Care*; 2nd edition. Worldwide Hospice Palliative Care Alliance, 2020.

16. Mah K., Namisango E., Luyirika E., Ntizi-mira C., Hales S., Zimmermann C. *et al.* Quality of Dy-

ing and Death of Patients with Cancer in Hospice Care in Uganda // *JCO Global Oncology*. 2023. Issue 9. DOI: 10.1200/GO.22.00386

17. Reid E., Lukoma M., Ho D., Bagasha P., Leng M., Namukwaya L. Palliative care needs and barriers in an urban Ugandan Emergency Department: A mixed-methods survey of emergency healthcare workers and patients // *African Journal of Emergency Medicine*. 2023. Vol. 13. Issue 4. Pp. 339–344. DOI: 10.1016/j.afjem.2023.11.005

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Асмик Рубеновна Клочко** — кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; KlochkoAR@mgso.ru.

INTRODUCTION

Palliative care in developed countries is evolving rapidly, but in African countries, where this type of care is desperately needed, it is still in its infancy [1]. The social conditions surrounding the organization of palliative care in African countries reflect numerous problems related to limited resources; cultural characteristics of the region; the absence of laws regulating the field of palliative care; the lack of necessary infrastructure, including poor logistics for accessing remote rural areas; problems with electricity supply and communications; the spread of human immunodeficiency virus, etc. [2].

There is a cultural barrier to discussing death and dying, which makes palliative care a sensitive topic. In some traditional communities, suffering and pain are seen as part of the journey of life that must be travelled alone, and this greatly discourages people from seeking help. It is generally accepted that in African cultures, care for the sick and dying is provided by the family, but this becomes quite a significant problem in conditions of poverty.

Palliative care is now integrated into the national health systems of some African countries (e.g. Uganda, South Africa, Kenya), and this could serve as a model for other regions where there is no palliative care network. A number of African countries have a limited number of palliative care centres, which face a shortage of qualified personnel. For example, even in Uganda, which is relatively well developed in terms of palliative care, with a population of about 50 million, there were only a few hundred certified specialists working at the beginning of 2024.

The governments of many African countries allocate limited funds to palliative care services, so the main organizers of palliative care development are non-profit

organizations that receive unstable funding from international associations. However, without coordinated efforts to develop and finance palliative care within health care systems, coverage remains low.

The existing palliative care facilities, which vary in format, cannot accommodate large numbers of people at the same time. Palliative care staff are forced to organize outreach services led by nurses with the support of social workers, doctors and spiritual mentors, often working on a voluntary basis. At the same time, palliative care remains inaccessible, especially for residents of remote areas.

The premises where palliative care is provided are most often not specifically designed for this function, but are located within hospitals (Fig. 1), churches, private homes and other single-purpose converted spaces that are static in structure and unable to adapt to change [3].

MATERIALS AND METHODS

The materials and methods of this study involve the analysis of publications on the topics of architectural design of hospices within African territories, logistical relationships, socio-economic and epidemiological conditions for the development of palliative care published between 2008 and 2024, submitted to eLibrary, Scopus, PubMed, Web of Science portals. An interdisciplinary approach is also applied, taking into account the influence of cultural, medical, demographic, sociological, managerial aspects on the architectural design of hospices within African countries.

The history of palliative care in Africa dates back to Zimbabwe, where the first Island hospice was established in 1979 (Fig. 2). The initial aims were to provide direct palliative care in the home for those diagnosed



Fig. 1. Palliative care unit at Mother of Mercy Hospital in Gidel, Sudan — the only hospital within a 500 km radius serving more than one million people

with life-threatening illnesses and to provide bereavement services for family members.

The Island Hospice was founded by Maureen Butterfield, whose daughter died of cervical cancer in 1977. In 1979, during a trip to England, Maureen learned about the emerging hospice movement and attended a symposium at WITS University in Johannesburg to hear a presentation by Cecily Saunders [4–11], who founded the first modern hospice in London in 1967, where high-quality palliative care was provided. Re-

turning home to Zimbabwe, Maureen organized a new service in Harare. Island is an acronym that stands for ‘integrated, meaningful life and death’. In 2014, the company expanded its range of services and changed its name to Island Hospice & Healthcare. Today, this hospice operates four branches across the country and works with the Ministry of Health and Child Welfare to integrate palliative care into the healthcare system and ensure that all Zimbabweans who need it receive it [12].



Fig. 2. The “Island” Hospice in Harare, Zimbabwe¹

¹ Island Hospice & Healthcare. URL: <https://www.findhealthclinics.com/ZW/Harare/261496887279618/Island-Hospice-%26-Healthcare#:~:text=Island%20Hospice%20Service%20Zimbabwe%20was,and%20a%20comprehensive%20bereavement%20service>

In South Africa, palliative care services appeared in the non-governmental sector in the 1980s, when the first hospices for patients with cancer and HIV were established. However, these facilities were only accessible to wealthy citizens [13].

Hospice Africa, founded in 1992 in Liverpool (United Kingdom) and later expanding its clinical and support operations worldwide, is a significant player in the field of palliative care for African countries. Opening its headquarters in Uganda, it developed an affordable and culturally appropriate model of palliative care for Africa, which is being replicated throughout the continent. Clinical teams provide comprehensive palliative care to patients on a daily basis in clinics or at home. It also works with partner organizations in many African countries to promote palliative care on the continent.

Since 2000, palliative care has been developing across the continent. By 2016, eight African countries had developed national palliative care programmes [14]. By 2017, 50 % of African health care facilities had staff responsible for palliative care². By 2020, hospice and palliative care units had been established in many hospitals and educational institutions in Africa, with a total of 1,085 palliative care services, despite economic difficulties and the COVID-19 pandemic [15].

RESEARCH RESULTS

It can be argued that today, palliative care services are actively developing in African countries. These services take many forms and depend on numerous factors, as they adapt to regional conditions, socio-economic realities, limited resources, infrastructure development levels, and cultural characteristics.

Below are the characteristic features and peculiarities of the architectural environment of palliative care facilities in African countries.

Functional features of architectural solutions

Although the current approach to treatment is focused on hospitalization, home care is a more popular option in Africa. Patients with cancer, HIV, end-stage renal failure, progressive neurological disorders and tuberculosis, especially drug-resistant tuberculosis, prefer to receive palliative care from visiting teams at home. Therefore, most modern palliative care facilities in Africa combine inpatient treatment, day care areas, and home care services, which is important in complex logistical conditions and provides support to patients with varying levels of needs.

The structure of palliative care facilities emphasizes the availability of special areas and rooms for social and psychological support for the population.

An important functional feature of palliative care facilities and hospices in African countries is the introduction of educational facilities where nurses, volunteers and family members are trained in basic skills for caring

for the seriously ill. For example, Africa Uganda Hospice [16, 17], a pioneer and leader in palliative care in Africa since its founding in 1993, combines medical services with a comprehensive training programme for local staff, which helps to expand access to care throughout the country.

The spaces of modern palliative care facilities in African countries are designed with the possibility of transformation and adaptation to other functions in mind. For example, rooms can be used for therapy as well as for educational or recreational activities. This, in turn, minimizes the costs of construction and operation of the building in conditions of limited resources.

Particular attention is paid to the functional simplicity of sanitary and utility services. Rooms for food preparation, sanitation, laundry and other purposes are designed to be compact, with simplified functional connections without complex logistics routes and branches.

Palliative care facilities are mainly built as single-storey buildings without complex communications (Fig. 3).

Stylistic features of architectural solutions

Architectural designs are traditionally made of local building materials such as clay bricks, raw bricks, straw, wood, coal, chalk, which in conditions of limited funding makes the buildings economical, as well as ecological and harmoniously integrated into the environment. The building's relationship with nature, decoration with ethnic motifs and patterns gives it compositional diversity and plays a cultural and therapeutic role, allowing patients and their loved ones to find solace in a natural familiar environment (Fig. 4).

Climatic features influencing architectural solutions

Architectural designs for palliative care facilities in African countries actively use architectural solutions that provide comfort without the use of expensive technologies. For example, solutions take into account complex climatic conditions by incorporating wide canopies into the project structure and creating green therapeutic areas and open shaded spaces (terraces, courtyards, galleries) that improve the microclimate inside the building. The thermal mass of compacted earth used in the construction of exterior walls allows the microclimate of rooms to be regulated, while natural ventilation methods minimize overheating. Natural lighting is used extensively to reduce energy consumption. In hot and dry climates, the size of openings is minimized, and solid walls are built on the side with maximum exposure to sunlight. In humid tropical areas, openings are enlarged to improve ventilation.

Cultural and religious characteristics influencing architectural solutions

In many African countries, palliative care works in conjunction with cultural customs and religious traditions, which helps the population to adapt more easily to this form of care and accept treatment. Public areas and rooms are designed to be spacious enough to accommodate large groups of people, supporting the col-

² APCA Atlas of Palliative Care in Africa. African Palliative Care Association. 2017. URL: <https://africanpalliativecare.org/resource-center/apca-atlas-palliative-care-africa>

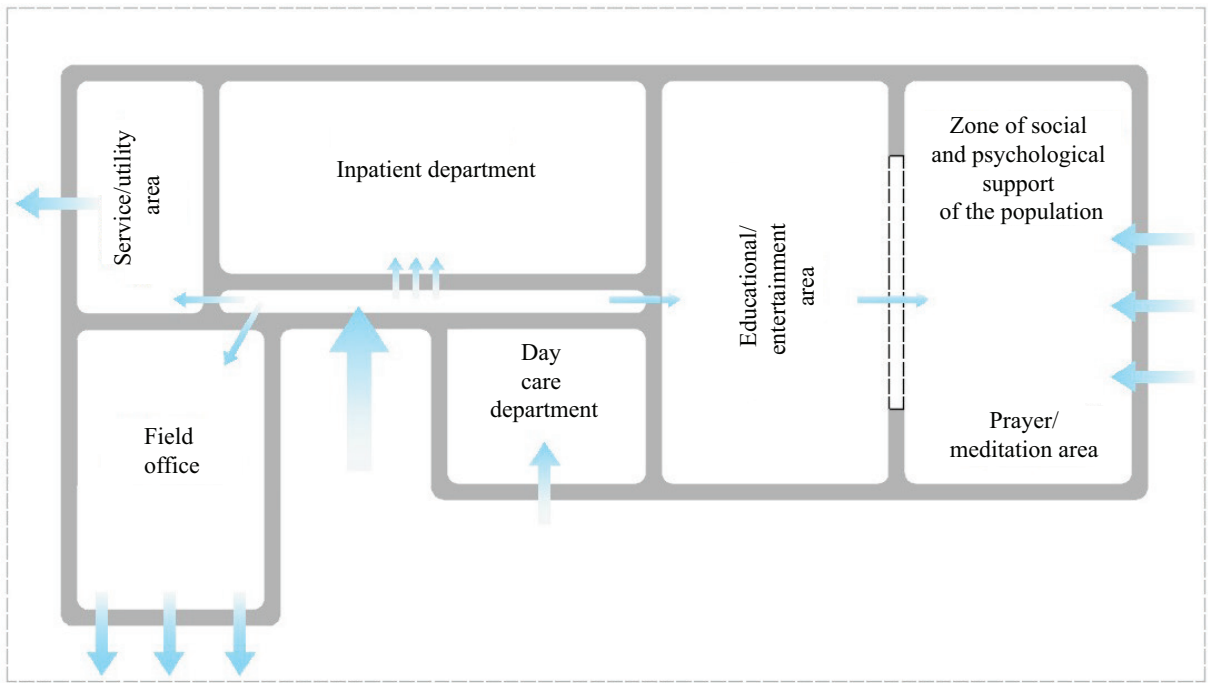


Fig. 3. Example of a functional diagram of an African palliative care facility

lective spirit of African communities. The mandatory presence of meeting rooms, courtyards, and event halls provides conditions for patients to interact with their loved ones. Mandatory areas for meditation and prayer are usually equipped with elements of traditional African symbolism.

Social and epidemiological characteristics influencing architectural solutions

The global HIV epidemic is catastrophic for African countries, with approximately one-fifth of the adult population infected with the virus. This is why many African palliative care facilities are specifically adapted



a



b



c



d



Fig. 4. Use of local materials and ethnic motifs in African architecture³: a — Nubia; b — Republic of South Africa; c — Nigeria; d — Ghana; e — Morocco; f — Uganda

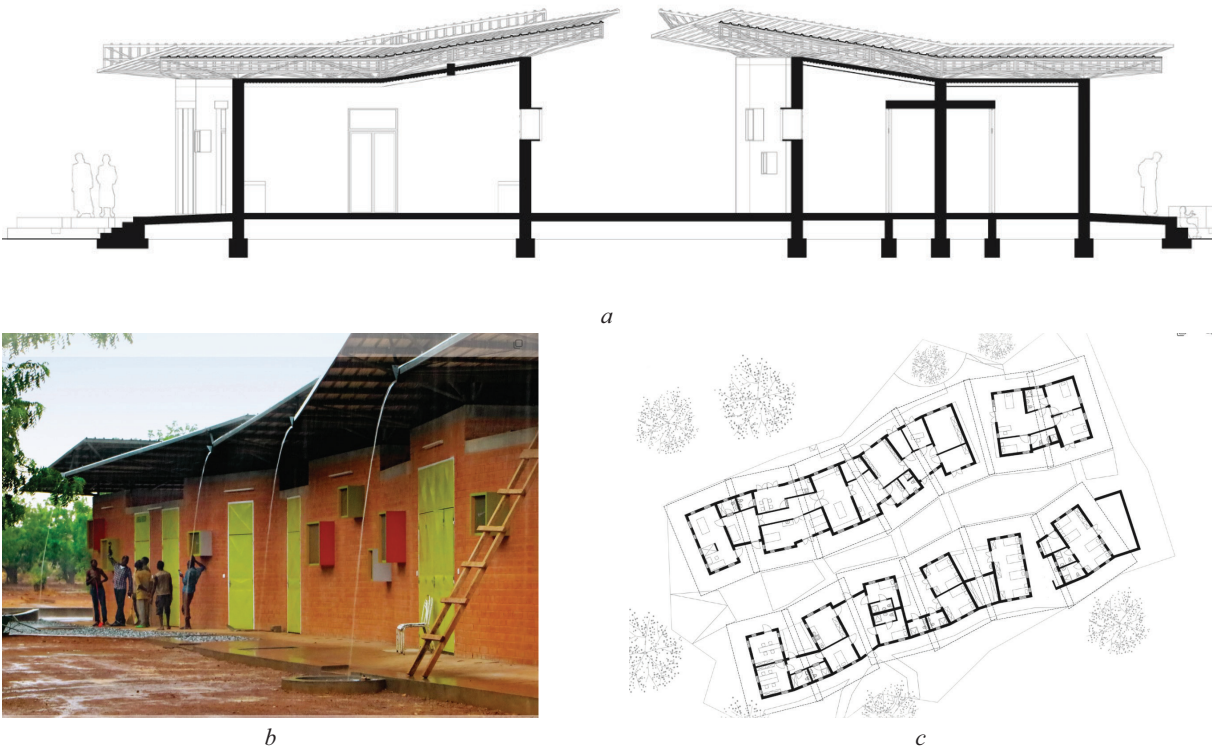


Fig. 5. Modular solutions as an example of a medical centre, Leo, Burkina Faso, architect Diébédo Francis Kéré, 2017

to combat HIV/AIDS and differ in their functional organization and architectural solutions. Most often, they are group residences or residential homes for several infected people, providing 4 to 50 beds with extended care, round-the-clock support and counselling. In large cities, there are also a number of hospices with more traditional programmes. However, in African countries, due to the dire situation with the spread of the human immunodeficiency virus, the concept of a ‘hospice’ is defined more broadly, reflecting the seriousness of the crisis.

Economic features affecting architectural solutions

Virtually all architectural activities in African countries are faced with extreme scarcity of funds and

difficulties in financing, resulting in the need to put cost minimization issues at the forefront. Above have been listed the features that in one way or the other relate to cost-saving issues. These include creating simple functional links and structures, designing compact single-storey buildings, using local materials, taking full account of climatic conditions and more. Modular designs are also becoming popular in terms of cost-effectiveness [20], which enable palliative care facilities to be built in phases as funding increases (Fig. 5).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The design features of palliative care facilities in African countries demonstrate how architectural solutions become a tool for adapting to unique contexts

³ Surgical and Health Centre, Léo. URL: <https://arquitecturaviva.com/works/surgical-and-health-center-in-leo#>

while maintaining a balance between functionality, cultural traditions, aesthetics and humanity.

It can be summarized that the main architectural differences from their global counterparts are that African institutions are more often built with the utmost minimization of construction and operating costs and

maximum emphasis on building functionality, flexibility and sustainability. Limited resources shift the emphasis from the high-tech solutions and availability of specialized medical spaces adopted in developed countries to simplicity and sustainability of architectural solutions that ensure their operational economy and longevity.

REFERENCES

1. Van der Plas W.Y., Benjamens S., Kruijff Sch. The increased need for palliative cancer care in Sub-Saharan Africa. *European Journal of Surgical Oncology*. 2020; 46(7):1373-1376. DOI: 10.1016/j.ejso.2020.03.212. EDN HEYFXK.
2. Powell R.A., Downing J., Radbruch L., Mwangi-Powell F.N., Harding R. Advancing palliative care research in Sub-Saharan Africa: from the Venice declaration, to Nairobi and beyond. *Palliative Medicine*. 2008; 22(8):885-887. 10.1177/0269216308098094
3. Narot S. *Rethinking the design for palliative care; exploring the concept of multigenerational living in Durban*. The School of Built Environment and Development Studies University of KwaZulu-Natal Durban, South Africa, 2019. URL: <https://core.ac.uk/download/304374386.pdf>
4. Klochko A.R., Yaseneckaya Iu.G. Modern trends in architectural design of hospices. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(2):2. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.2. EDN GCRCTJ. (rus.).
5. Figueres J., McKee M., Mossialos E., Saltman R.B. *Hospital reform in new Europe; Translated from English*. Moscow, The Whole World, 2003; 320. (rus.).
6. Adams A. Home and/or Hospital: The Architectures of End-of-Life Care. *Change Over Time*. 2016; 6(2):248-263. DOI: 10.1353/cot.2016.0015
7. Ahuja N. End Stages. *Places Journal*. 2018. DOI: 10.22269/180515
8. Gromova A.S., Litvinova O.G. Salutogenesis concept for hospice design. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(2):9-23. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-9-23. EDN YHZQHC. (rus.).
9. Klochko A. Hospices in the infrastructure of the cities of the RF. *Project Baikal*. 2021; 18(70):162-168. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1908. EDN CTUQER. (rus.).
10. Klochko A.R. Trends in the Design of Hospices and Palliative Centers in the Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988:052068. DOI: 10.1088/1755-1315/988/5/052068
11. Kotgirwar Y. Trends in Hospice Architecture. *Seminar and Technical writing-II PA 494*. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.13285.65763
12. Zvakawapano W. I am and I will: remembering how Africa's first hospice was founded 40 years ago. *Ehospice*. 2019. URL: https://ehospice.com/sa_posts/i-am-and-i-will-remembering-how-africas-first-hospice-was-founded-40-years-ago/
13. Jencks C., Heathcote E. *Architecture and Health. The Architecture of Hope: Maggie's Cancer Caring Centres*. London, Frances Lincoln, 2015.
14. Luyirika E.B. K., Namisango E., Garanganga E., Monjane L., Ginindza N., Madonsela G. et al. Best practices in developing a national palliative care policy in resource limited settings: lessons from five African countries. *Ecancermedicalscience*. 2016; 10. DOI: 10.3332/ecancer.2016.652
15. Connor S. *Global Atlas of Palliative Care; 2nd ed*. Worldwide Hospice Palliative Care Alliance, 2020.
16. Mah K., Namisango E., Luyirika E., Ntirimira C., Hales S., Zimmermann C. et al. Quality of Dying and Death of Patients with Cancer in Hospice Care in Uganda. *JCO Global Oncology*. 2023; 9. DOI: 10.1200/GO.22.00386
17. Reid E., Lukoma M., Ho D., Bagasha P., Leng M., Namukwaya L. Palliative care needs and barriers in an urban Ugandan Emergency Department: A mixed-methods survey of emergency healthcare workers and patients. *African Journal of Emergency Medicine*. 2023; 13(4):339-344. DOI: 10.1016/j.afjem.2023.11.005

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on June 11, 2025.

Approved for publication on June 19, 2025.

BIONOTES: Asmik R. Klochko — Candidate of Architecture, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KlochkoAR@mgsu.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.8

Опрос жителей многоквартирных жилых домов о качестве капитального ремонта

Анна Владимировна Корнилова^{1,2}, Валентин Алексеевич Ермаков¹,
Алексей Васильевич Баулин¹

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

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящий момент более 3,5 млн москвичей живут в многоквартирных жилых домах (МКД) с капитальным ремонтом. В 2015 г. стартовала московская программа капитального ремонта. Программа рассчитана до 2044 г. В нее включены 29 тыс. домов. Качество капитального ремонта, условия проживания граждан в условиях ремонта находятся под пристальным вниманием граждан и средств массовой информации. Однако, несмотря на прозрачность процесса организации капитального ремонта и внимание общественных организаций к его проведению, количество жалоб жителей на сайте мэра Москвы не уменьшается. Этот факт и вызвал необходимость проведения опроса.

Материалы и методы. Выполнен опрос методом Дельфи, отличительная черта которого — итеративный процесс: респонденты отвечают на вопросы в несколько раундов, при этом каждый последующий раунд строится на результатах предыдущего. В опросе участвовало 160 жителей Москвы и ближайшего Подмосковья в возрасте от 18 до 75 лет, из них 47 женщин, 113 мужчин.

Результаты. Оба этапа опроса показали, что вопрос удобства жителей при выполнении капитального ремонта МКД для жителей не приоритетный. Жители всех возрастов и гендеров готовы потерпеть неудобства в процессе ремонта. Приоритетным является вопрос применения качественных, нетоксичных материалов и качество отделки. Для женщин всех возрастов оказался важным вопрос стоимости проведенного ремонта.

Выводы. Осуществленный опрос позволил рассчитать весовые коэффициенты факторов, что привело к созданию методики экспресс-оценки капитального ремонта в МКД на основе статистического подхода. Изучение общественного мнения на следующем уровне даст возможность выявить актуальные вопросы при проведении капитального ремонта (обоснование и составление планов работ, выбор эффективных и приемлемых технологических решений и др.), а также дополнить существующие нормативные документы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальный ремонт, опрос, респондент, функция желательности Харрингтона, метод Дельфи, уровень значимости, доверительная вероятность

Благодарности. Авторы благодарят всех жителей МКД, принявших участие в опросе, и рецензентов статьи за внимательный и доброжелательный подход к данному исследованию.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Корнилова А.В., Ермаков В.А., Баулин А.В. Опрос жителей многоквартирных жилых домов о качестве капитального ремонта // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 8. URL: <http://nsjournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.8

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, Ermakov@mgsu.ru.

Survey of residents of multi-apartment residential buildings on the quality of major repairs

Anna V. Kornilova^{1,2}, Valentin A. Ermakov¹, Aleksei V. Baulin¹

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

² Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, more than 3.5 million Muscovites live in apartment buildings (AB) with major repairs. In 2015, the Moscow capital repair program was launched. The program is designed until 2044. It includes: 29 thousand houses. The quality of major repairs is under the close attention of citizens and the media. However, despite the transparency of the process of organizing capital repairs the number of complaints from residents on the website of the mayor of Moscow does not decrease. This fact caused the need for a survey.

Materials and methods. The authors conducted a survey using the Delphi method. 160 residents of Moscow and the nearest Moscow region participated in the survey.

Results. Both stages of the survey showed that the residents are ready to suffer inconveniences during the renovation process. And the priority is the use of high-quality, non-toxic materials and the quality of the finish.

Conclusions. The survey made it possible to calculate the weighting factors of the factors, which led to the creation of a methodology for rapid assessment of capital repairs in the AB based on a statistical approach. The study of public opinion at the next level will allow to identify topical issues during major repairs (justification and preparation of work plans, selection of effective and acceptable technological solutions, etc.), as well as to supplement existing regulatory documents.

KEYWORDS: major repairs, survey, respondent, Harrington desirability function, Delphi method, significance level, confidence probability

Acknowledgments. The authors thank all the residents of the apartment building who took part in the survey and the reviewers of the article for their attentive and friendly approach to this study.

FOR CITATION: Kornilova A.V., Ermakov V.A., Baulin A.V. Survey of residents of multi-apartment residential buildings on the quality of major repairs. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):8. URL: <http://Inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.8

Corresponding author: Valentin A. Ermakov, Ermakov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент более 3,5 млн москвичей живут в домах с капитальным ремонтом¹. В 2015 г. стартовала московская программа капитального ремонта — один из самых масштабных проектов модернизации жилья в России и в мире. Программа рассчитана до 2044 г. В нее включены: 29 тыс. домов (общая площадь 290 млн м²); более 420 тыс. инженерных систем и конструктивных элементов зданий; замена 115 тыс. лифтов. Основные задачи, которые решают при проведении капитальных ремонтов жилых домов, — решение проблемы неполного ремонта домов, выполненного в прежние годы; улучшение внешнего вида домов; повышение комфорта; сохранение историко-культурного портрета города и безопасности московских многоэтажек¹. На указанном сайте¹ подробно описан алгоритм осуществления капитального ремонта многоквартирных жилых домов (МКД) от размещения предложения о проведении капитального ремонта до приемки работ (подписание акта). Качество капремонта, условия проживания граждан в условиях ремонта находятся под пристальным вниманием граждан и средств массовой информации. В 2015 г. введен ГОСТ Р 56193–2014². Сразу после запуска программы Центра ОНФ «Народная экспертиза» выпущено практическое пособие, посвященное вопросам организации капитального

ремонта общего имущества³. Несмотря на прозрачность процесса организации капитального ремонта и внимание общественных организаций к его проведению, количество жалоб жителей на сайте мэра Москвы не уменьшается⁴. Следовательно, изучение общественного мнения по этому вопросу и принятие решений по устранению возникающих проблем в настоящий момент является актуальной задачей.

Один из эффективных способов оценки качества выполнения ремонтов — опрос общественного мнения. Исследования, осуществленные ранее, рассматривают вопросы общего характера (информированность, участие в собраниях по вопросам капитального ремонта, сбор средств) [1]. Отмечается, что собственники жилья порой практически не могут (или не хотят) повлиять на ход ремонта [2, 3] или их жалобы игнорируются исполнителями [4]. При этом федеральный закон регламентирует процедуру возмещения вреда, причиненного жизни или здоровью физических лиц при выполнении капитального ремонта⁵.

Обзор зарубежных источников по вопросу капитального ремонта многоквартирных домов в качестве

¹ Капитальный ремонт жилых домов. URL: <https://www.mos.ru/city/projects/kapremont/#>

² ГОСТ Р 56193–2014. Услуги жилищно-коммунального хозяйства и управления многоквартирными домами. Услуги капитального ремонта общего имущества многоквартирных домов. Общие требования.

³ Контроль за процессом капитального ремонта общего имущества: права и возможности граждан-собственников : практическое пособие. URL: <https://fondkr10.ru/assets/dokumenty/Informaciya-sobstvennikam/Publikacii-broshyury-pamyatki/Prakticheskoe-posobie-Kontrol-za-processom-kapitalnogo-remonta-obshego-imushchestva.pdf>

⁴ Личный блог Сергея Собянина. URL: <https://www.sobyenin.ru/program/ticket/512>

⁵ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ, ст. 60.

основного направления исследований выявил тему энергоэффективности проводимых мероприятий [5–7]. Встречаются труды, посвященные многокритериальной оценке подрядчиков [8], а также разработке моделей оценки времени ремонта здания на основе машинного обучения [9].

Авторам данного исследования представляется, что в современных российских условиях наиболее объективную оценку качества капитального ремонта и разработку путей его улучшения может дать только опрос общественного мнения с репрезентативной выборкой респондентов. В работе поставлена цель взглянуть на проблему выполнения капитального ремонта МКД с точки зрения конечного потребителя — жителей МКД в период капитального ремонта без отселения и после ремонта. Проведенный опрос выявил, что приоритетным фактором для жителей МКД всех возрастов и гендеров при оценке капитального ремонта является применение качественных, нетоксичных материалов и качество отделки. Для женщин всех возрастов оказался актуальным вопрос стоимости ремонта. Его важность для этой группы респондентов оказалась практически на уровне значения качества материалов. С целью практического применения полученных результатов были рассчитаны по общей выборке респондентов весовые коэффициенты каждого исследуемого фактора, что дало возможность создать методику экспресс-оценки качества проводимых капитальных ремонтов с точки зрения конечного потребителя — жителей МКД на основе вербально-числовых шкал Харрингтона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторами осуществлен опрос методом Дельфи — это метод прогнозирования и принятия решений, основанный на анонимном сборе мнений группы экспертов (респондентов). Отличительная черта метода Дельфи — итеративный процесс: эксперты (респонденты) отвечают на вопросы в несколько раундов, при этом каждый последующий раунд строится на результатах предыдущего. Метод Дельфи в строительстве применяется, например, для оценки критических факторов, влияющих на человеческие ошибки, связанные с проектными решениями [10]; оценки системы энергопотребления [11]; выявления основных причин несчастных случаев на строительных площадках [12]; оценки рисков несчастных случаев на строительных площадках, вызванных усталостью рабочих [13]; исследования перспектив строительства деревянных многоэтажных домов [14]; изучения проблем обеспечения безопасности на малых и средних строительных предприятиях [15].

Обоснование выбора количества респондентов

В опросе участвовало 160 жителей Москвы и ближайшего Подмосковья в возрасте от 18 до 75 лет, из них 47 женщин, 113 мужчин. Для решения вопроса о достаточности для поставленной задачи количества

респондентов был привлечен аппарат математической статистики. В литературе [16] приводится правило расчета минимального количества респондентов (экспертов) m_{\min} в зависимости от допустимой величины ошибки, согласно которому справедливо выражение:

$$m_{\min} = 0,5 \cdot \left(\frac{3}{\alpha} + 5 \right), \quad (1)$$

где α — ошибка результата проводимого анализа, принимающая значения от 0 до 1 (уровень значимости). В соответствии с данными публикации [16] выражение (1) наиболее применимо при проведении опроса методом Дельфи. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ (доверительной вероятности 0,95) по формуле (1) минимальное количество респондентов 33; для уровня значимости 0,01 (доверительной вероятности 0,99) минимальное количество респондентов 152.

Очевидно, что количество экспертов, участвовавших в проведенном опросе, достаточно ($m > m_{\min}$) на самом высоком уровне доверительной вероятности.

Выбор оцениваемых факторов

С целью первичного опроса выбраны следующие факторы, которые требовалось ранжировать респондентами:

- соблюдение сроков выполнения ремонтных работ;
- стоимость выполненных работ;
- качество отделочных работ;
- удобная для жителей организация мест временного складирования материалов;
- использование экологически чистых, нетоксичных материалов;
- качество замены лифтового оборудования.

Факторы выбраны из соображений затрат времени и средств, а также обеспечения безопасности при выполнении капитального ремонта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первичная обработка результатов опроса

При заполнении опросной таблицы использовали следующие правила: наиболее значимому фактору присваивался ранг 1, наименее значимому — 6. Если респондент не учитывал один фактор, то в качестве оценки принималась максимальная величина ранга, если респондентом не учтены несколько характеристик, то им присваивались одинаковые ранги, равные среднему арифметическому оставшихся неиспользованных оценок. Для оценки согласованности мнений респондентов использовался альтернативный коэффициент согласованности [17, 18], представляющий собой модификацию коэффициента конкордации Кендалла как множественного варианта ранговой корреляции:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - 3m(2m(n+1) - 1) \cdot \partial(n, m)}; \quad (2)$$

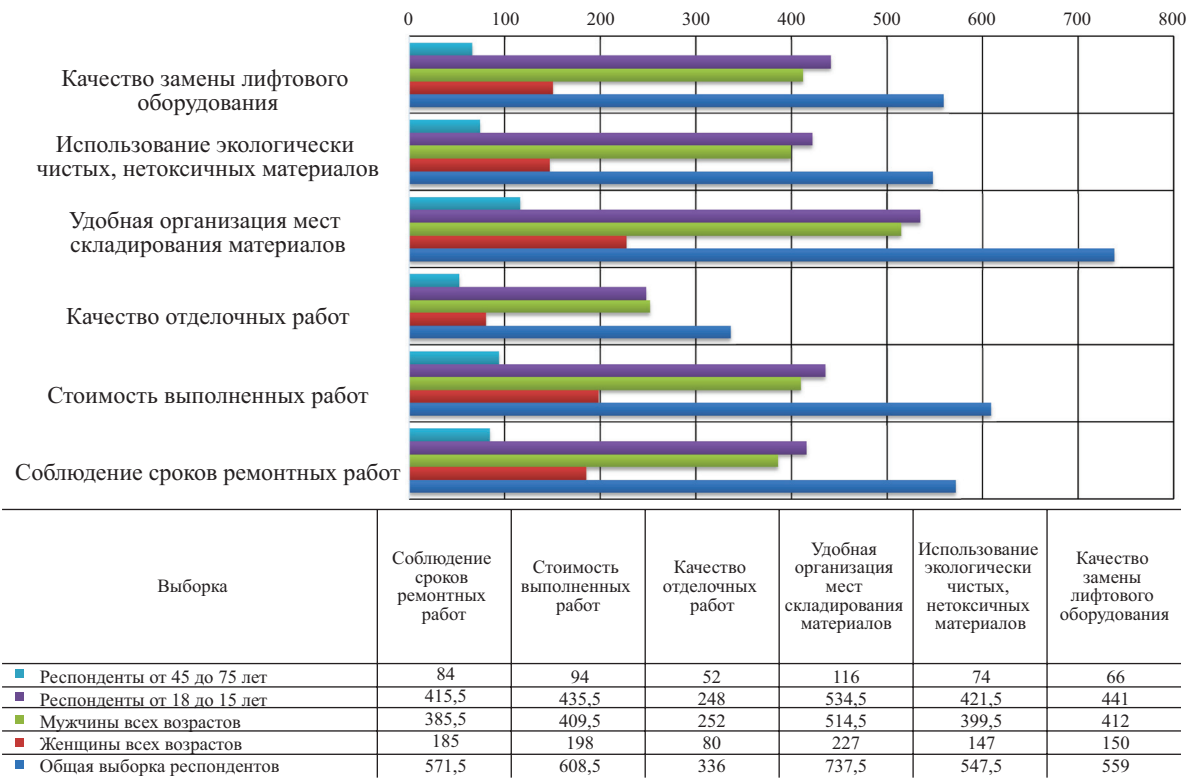


Рис. 1. Распределение суммы рангов по факторам

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m r_{ik} - 0,5m(n+1) \right]^2;$$
$$\partial(n, m) = \begin{cases} 0, & \text{при } m(n+1) \text{ четное число} \\ 1, & \text{при } m(n+1) \text{ нечетное число} \end{cases},$$

где n — количество факторов.

На рис. 1 показано распределение сумм рангов по всем рассматриваемым вариантам выборок. Очевидно, что в этом опросе минимальная сумма рангов (наиболее значимый фактор) соответствует фактору «Качество отделочных работ», максимальное — фактору «Удобная для жителей организация мест временного складирования материалов» (наименее значимый фактор). Тем не менее делать выводы по результатам этой части исследования было бы некорректно без оценки значимости расчетных значений коэффициентов конкордации.

Расчетные значения коэффициента конкордации по всем выборкам респондентов приведены в табл. 1 (столбец 4). Очевидно, что с формальной точки зрения только один из коэффициентов конкордации (выборка «Женщины») соответствует удовлетворительной согласованности мнений респондентов (0,5). Но для опросов с большим количество респондентов такой подход является неполным (этот вопрос рассмотрен далее). Поэтому проводится оценка значимости полученных значений коэффициентов конкордации по двум критериям — χ^2 Пирсона и Z -критерий Фишера.

Согласно работе [16], эмпирическое значение критерия Пирсона определяется по выражению:

$$\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W. \tag{3}$$

Число степеней свободы $\nu = n - 1$. Для всех выборок значение степени свободы 5. Эмпирические значения χ^2 в столбце 5 табл. 1.

Для Z -критерия Фишера, согласно публикации [16], в качестве критической статистики используется величина:

$$Z = 0,5 \cdot \ln[(n + 1)W/(1 - W)]. \tag{4}$$

Степени свободы статистики (4) по работе [16] рассчитываются для задачи определения значимости как:

$$\nu_1 = n - 1; \nu_2 = (m - 1) \cdot \nu_1. \tag{5}$$

Расчетные данные внесены в табл. 1, столбцы 7–9. Так как по данным табл. 1 для всех выборок эмпирическое значение χ^2 больше критериального значения даже для уровня значимости 0,01, то мнения экспертов на этом уровне значимости можно считать согласованными во всех рассмотренных выборках. Аналогичный результат показал анализ данных по критерию Фишера.

Второй тур исследования. Группирование факторов

Далее согласно идеологии используемого метода опроса проведено группирование факторов (табл. 2) по трем группам, условно обозначенным как «Организация проведения капитального ремонта», «Стоимость проведения капитального ремонта» и «Качество

Табл. 1. К расчету значимости коэффициентов конкордации

Выборка	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>W</i> по выражению (2)	χ^2 по формуле (3)	χ^2 критериальное значение	<i>Z</i> по выражению (4)	<i>v</i> ₁	<i>v</i> ₂	<i>Z</i> критериальное значение
							по формуле (5)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Общая выборка респондентов	160	6	0,19	152,00	11,07 (уровень значимости 0,05) 15,07 (уровень значимости 0,01)	0,25	5	795	2,2 (уровень значимости 0,05) 2,8 (уровень значимости 0,01)
Женщины всех возрастов	47	6	0,51	119,85		0,99	5	230	
Мужчины всех возрастов	113	6	0,16	90,40		0,14	5	560	
Респонденты от 18 до 25 лет включительно	119	6	0,17	101,15		0,18	5	590	
Респонденты от 45 до 75 лет вкпочительно	23	6	0,27	31,05		0,48	5	110	

Табл. 2. Группирование факторов

Факторы	Объединенные группы факторов
Соблюдение сроков выполнения ремонтных работ	Организация проведения капитального ремонта (продолжительность, сроки, складирование материалов)
Удобная для жителей организация мест временного складирования материалов	
Стоимость выполненных работ	Стоимость проведения капитального ремонта (включая затраты на материалы и лифтовое оборудование)
Качество замены лифтового оборудования	
Качество отделочных работ	Качество отделочных работ и применяемых материалов
Использование экологически чистых, нетоксичных материалов	

отделочных работ и применяемых материалов», далее «Организация», «Стоимость», «Качество».

Результаты статистической обработки второго тура приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Также для практического применения полученных результатов были рассчитаны по общей выборке респондентов весовые коэффициенты каждого исследуемого фактора: «Организация» — 0,165, «Стоимость» — 0,335, «Качество» — 0,500.

Практическое применение полученных результатов для оценки качества капитального ремонта в МКД

В качестве небольшого примера рассмотрим опрос в МКД г. Москвы после осуществления капитального ремонта. Респондентами являются жители дома всех возрастов и гендеров. Оценивались факторы «Организация проведения капитального ремонта (продолжительность, сроки, складирование материалов)», «Качество отделочных работ и применяемых матери-

Табл. 3. Результаты согласованности экспертов во втором туре

Выборка	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>W</i> по выражению (2)	Доверительная вероятность по Пирсону	Уровень значимости
Общая выборка респондентов	160	3	0,77	0,99	0,01
Женщины всех возрастов	47	3	0,66	0,99	0,01
Мужчины всех возрастов	113	3	0,71	0,99	0,01
Респонденты от 18 до 25 лет включительно	119	3	0,73	0,99	0,01
Респонденты от 45 до 75 лет включительно	23	3	0,80	0,99	0,01

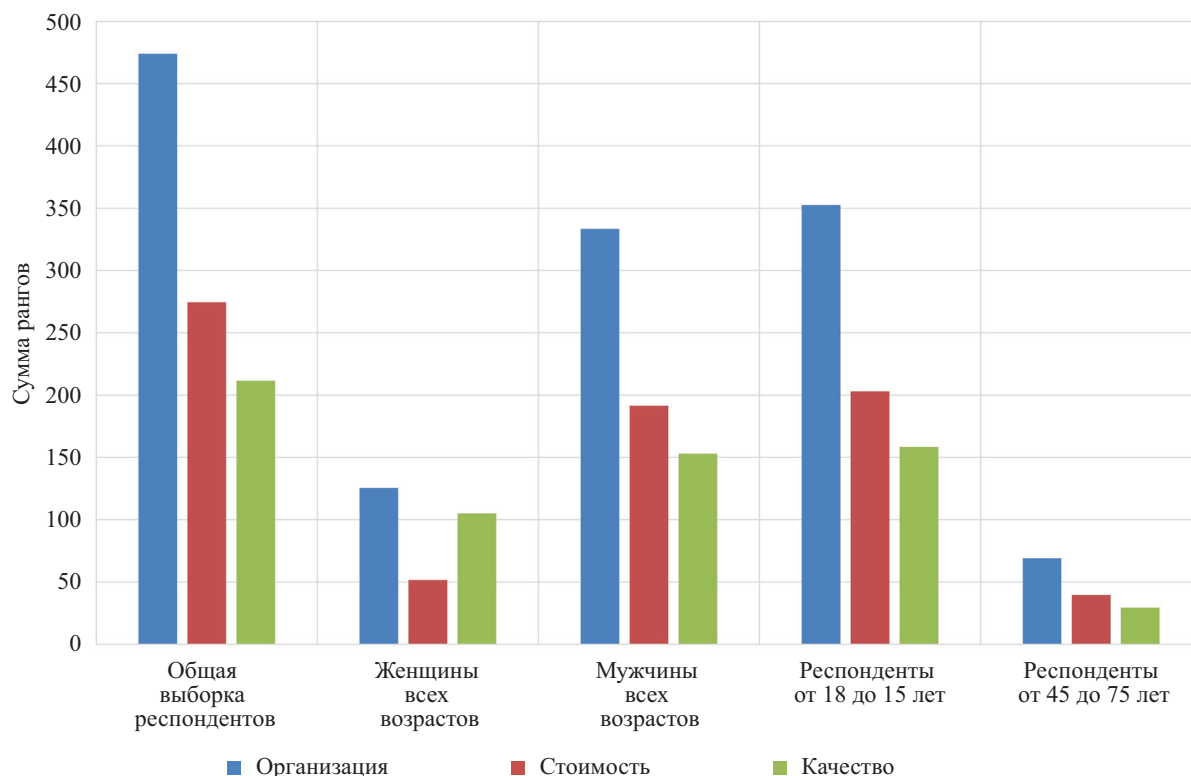


Рис. 2. Расчетные значения сумм рангов

алов», «Стоимость проведения капитального ремонта (включая затраты на материалы и лифтовое оборудование)». Оценка велась по 10-балльной шкале, самый высокий балл — 10, самый низкий — 1. Средний балл выполненного опроса по фактору «Организация» — 3,2, по фактору «Качество» — 4,8, по фактору «Стоимость» — 9,5. Необходимо дать комплексную оценку произведенного капитального ремонта.

С целью решения задачи используем обобщенную функцию желательности Харрингтона, применяемую для формализации субъективных неопределенностей в многокритериальных задачах, например для оценки эффективности мероприятий по охране

труда [19, 20]. Показатель желательности изменяется в пределах от 0 (наихудший) до 1 (наилучший). Частные показатели могут изменяться в пределах от 2 до 5 (рис. 3). Формула, описывающая «кривую желательности» Харрингтона:

$$d = \exp[-\exp(-Y)], \quad (6)$$

определяет функцию с двумя участками насыщения (в $d \rightarrow 0$ и $d \rightarrow 1$) и линейным участком между ними. Y — некоторая безразмерная величина, связанная со значением натурального фактора линейным законом:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot Y_n, \quad (7)$$

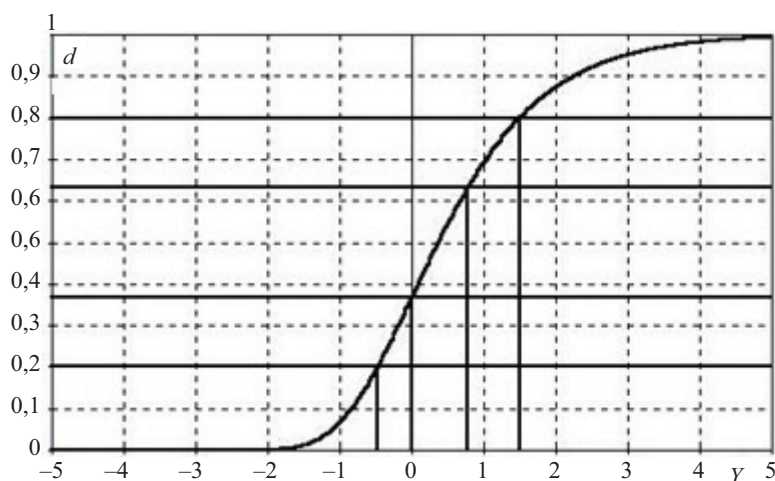


Рис. 3. Графическое изображение левой ветви функции желательности Харрингтона при одностороннем ограничении

Табл. 4. Частные желательности по Харрингтону

Фактор	Средний балл по опросу Y_n	Весовые коэффициенты k_i	Y	d по выражению (8)	Вербализация значений частных желательностей
Стоимость	9,5	0,335	4,630	0,99	Очень хорошо
Качество	4,8	0,500	0,963	0,68	Хорошо
Организация	3,2	0,165	-0,284	0,26	Плохо

где Y_n — натуральные факторы, в рассматриваемом случае средние баллы, полученные в результате опроса.

Ось координат Y является шкалой частных показателей, ось d — шкалой желательности. Шкала желательности делится в диапазоне от 0 до 1 на пять поддиапазонов: $[0; 0,20]$ — «очень плохо»; $[0,20; 0,37]$ — «плохо»; $[0,37; 0,63]$ — «удовлетворительно»; $[0,63; 0,80]$ — «хорошо»; $[0,8; 1,00]$ — «очень хорошо».

Подставим в уравнение (6) реперные значения шкалы желательности d , получим следующие выражения: $1 = \exp[-\exp(-Y_0)]$; $0,80 = \exp[-\exp(-Y_1)]$; $0,63 = \exp[-\exp(-Y_2)]$; $0,37 = \exp[-\exp(-Y_3)]$; $0,20 = \exp[-\exp(-Y_4)]$. После двойного логарифмирования: $Y_0 = 5,0000$; $Y_1 = 1,5000$; $Y_2 = 0,7725$; $Y_3 = 0,0057$; $Y_4 = -0,475$; $Y_5 = -2,0000$. Подставив в выражение (7) крайние значения шкалы Y (максимальной и минимальной желательностям d), получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot Y_{n \max} = 5; \\ a_0 + a_1 \cdot Y_{n \min} = -2. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, подставив вместо $Y_{n \max}$ максимальное число баллов из возможных по условиям проведения опроса (10), вместо $Y_{n \min}$ минимальное число баллов из возможных (1), получаем формулу для преобразования натуральных параметров в частные желательности:

$$d = \exp(-\exp(-(-2,78 + 0,78 \cdot Y_n))). \tag{8}$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.

С учетом весовых коэффициентов получаем обобщенный результат:

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{k_i} = 0,99^{0,335} \cdot 0,68^{0,5} \cdot 0,26^{0,165} = 0,66.$$

Полученное значение относится к показателю «Хорошо».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных в результате обработки данных опроса выявил ряд интересных тенденций. Оба этапа показали (рис. 1, 2), что вопрос удобства жителей при проведении капитального ремонта МКД для самих жителей не приоритетный. Жители всех возрастов и гендеров готовы потерпеть неудобства в процессе ремонта. А приоритетным являет-

ся вопрос применения качественных, нетоксичных материалов и качество отделки. Для женщин всех возрастов оказался важным вопрос стоимости выполненного ремонта. Его актуальность для этой группы респондентов практически на уровне качества материалов. Это связано с тем, что именно женщины контролируют расходы в семьях и следят, чтобы выделенные на капитальный ремонт средства расходовались целенаправленно.

Осуществленный опрос позволил рассчитать весовые коэффициенты факторов, что привело к созданию методики экспресс-оценки капитального ремонта в МКД на основе статистического подхода. Для практического применения полученных результатов рассчитаны по общей выборке респондентов весовые коэффициенты каждого исследуемого фактора: «Организация» — 0,165; «Стоимость» — 0,335; «Качество» — 0,5, что позволило создать методику экспресс-оценки качества выполняемых капитальных ремонтов с точки зрения конечного потребителя — жителей МКД на основе вербально-числовых шкал Харрингтона.

Обработка результатов опроса показала, что для оценки достоверности проводимых методом Дельфи опросов следует ориентироваться на достижение большей доверительной вероятности, а не только на величину коэффициента конкордации.

Изучение общественного мнения на следующем уровне даст возможность выявить актуальные вопросы при осуществлении капитального ремонта (обоснование и составление планов проведения работ, выбор эффективных и приемлемых технологических решений и др.), а также дополнить существующие нормативные документы^{6, 7, 8}.

Методологические основы данного исследования частично были доложены на Международном симпозиуме «The future of the construction industry: challenges and development prospects» [21].

⁶ МДК 2-03.2003. Правила и нормы технической эксплуатации жилищного фонда.

⁷ СП 368.1325800.2017. Здания жилые. Правила проектирования капитального ремонта.

⁸ ВСН 41-85(р). Инструкция по разработке проектов организации и проектов производства работ по капитальному ремонту жилых зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыбикова Д.Г. Участие собственников в решении вопросов капитального ремонта многоквартирных домов // Вестник РГГУ. Серия: Философия. Социология. Искусствоведение. 2017. № 2 (8). С. 46–56. EDN ZIDMFL.
2. Ермишина А.В. Цифровизация в системе организации капитального ремонта многоквартирных домов в России // Journal of Economic Regulation. 2022. Т. 13. № 4. С. 108–115. DOI: 10.17835/2078-5429.2022.13.4.108-115. EDN QESXBV.
3. Какадий В.И., Какадий И.И. Управление системой капитального ремонта многоквартирных домов // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 2. С. 43. EDN RZKFCH.
4. Хмелева Г.А., Трифонова Д.Ю. Государственный контроль капитального ремонта многоквартирных домов, проблемы и способы их решения // Вестник науки и образования. 2019. № 10–4 (64). С. 38–40. EDN MYWELD.
5. Niemela T., Kosonen R., Jokisalo J. Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings // Energy and Buildings. 2017. Vol. 137. Pp. 60–75. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.031
6. Gram-Hanssen K., Bonderup S., Aagaard L.K., Møller Askholm M.A. Energy justice in heat metering: Findings from a Danish experiment of metering and distribution in residential apartment buildings // Energy Research & Social Science. 2023. Vol. 104. P. 103250. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103250
7. Choi J., Kim J. Techno-economic feasibility study for deep renovation of old apartment // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 382. P. 135396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135396
8. Zavadskas E.K., Vilutiene T. A multiple criteria evaluation of multi-family apartment block's maintenance contractors: I-Model for maintenance contractor evaluation and the determination of its selection criteria // Building and Environment. 2006. Vol. 41. Issue 5. Pp. 621–632. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.02.019
9. Kwon N., Ahn Y., Son B.S., Moon H. Developing a machine learning-based building repair time estimation model considering weight assigning methods // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. P. 102627. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102627
10. Sarvari H., Baghbaderani A.B., Chan D.W.M., Beer M. Determining the significant contributing factors to the occurrence of human errors in the urban construction projects: A Delphi-SWARA study approach // Technological Forecasting and Social Change. 2024. Vol. 205. P. 123512. DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123512
11. Kajjoba D., Wesonga R., Olupot P.W., Kirabira J.B., Lwanyaga J.D., Kasedde H. Prioritizing sustainability indicators for Uganda's Built Environment: Expert perspectives using the Delphi technique // Results in Engineering. 2024. Vol. 24. P. 103182. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103182
12. Mohandes S.R., Sadeghi H., Fazeli A., Mahdiyar A., Hosseini M.R., Arashpour M. et al. Causal analysis of accidents on construction sites: A hybrid fuzzy Delphi and DEMATEL approach // Safety Science. 2022. Vol. 151. P. 105730. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105730
13. Yusoff H.M., Heng P.P., Illias M.R., Karriyapayah S., Fadhli M.A., Hod R. A qualitative exploration and a Fuzzy Delphi validation of high-risk scaffolding tasks and fatigue-related safety behavioural deviation among scaffolders // Heliyon. 2024. Vol. 10. Issue 15. P. e34599. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34599
14. Hurmekoski E., Pykäläinen J., Hetemäki L. Long-term targets for green building: Explorative Delphi backcasting study on wood-frame multi-story construction in Finland // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. Pp. 3644–3654. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.031
15. Bachar R., Urlainis A., Wang K.-C., Shohet I.M. Optimal allocation of safety resources in small and medium construction enterprises // Safety Science. 2025. Vol. 181. P. 106680. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106680
16. Араб-Оглы Э.А., Бестужев-Лада И.В., Гаврилов Н.Ф. и др. Рабочая книга по прогнозированию. М.: Мысль, 1982. 430 с.
17. Попов Г.А., Попова Е.А. Альтернативный вариант коэффициента конкордации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 158–167. EDN QJBSGT.
18. Попов Г.А., Попова Е.А. Асимптотическое поведение альтернативного варианта коэффициента конкордации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 153–160. EDN RUDUIL.
19. Фомина Е.Е., Кузьминова А.С. Методика оценки результативности системы управления охраной труда и промышленной безопасностью // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 8. С. 77–83. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-77-83. EDN RYLXRK.
20. Порошин А.А., Бобринев Е.В., Удацова Е.Ю., Кондашов А.А. Динамическая модель оценки состояния системы управления охраной труда: применение байесовского подхода // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 9. С. 26–30. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-26-30. EDN ZGJSGS.
21. Kornilova A., Ermakov V., Baulin A. Methodological approaches to the assessment of public opinion during the overhaul of apartment buildings // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 457. P. 02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202345702051

Поступила в редакцию 29 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 5 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 12 декабря 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Владимировна Корнилова — доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; профессор, Инженерная академия; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН);** 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; SPIN-код: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; KornilovaAV@mgsu.ru;

Валентин Алексеевич Ермаков — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru;

Алексей Васильевич Баулин — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 270399, Scopus: 57217598258, ResearcherID: AFO-0397-2022, ORCID: 0000-0003-2874-6704; BaulinAV@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Currently, more than 3.5 million Muscovites live in buildings that have undergone major repairs¹. In 2015, Moscow launched a major repair programme, one of the most ambitious housing modernization projects in Russia and the world. The programme is scheduled to run until 2044. It includes: 29,000 buildings (with a total area of 290 mln m²); more than 420,000 engineering systems and structural elements of buildings; replacement of 115,000 lifts. The main objectives of the major repairs to residential buildings are to resolve the issue of incomplete repairs carried out in previous years; improve the appearance of buildings; increase comfort; preserve the historical and cultural image of the city and the safety of Moscow's high-rise buildings¹. The website¹ describes in detail the algorithm for carrying out major repairs of apartment buildings (AB), from the submission of a proposal for major repairs to the acceptance of work (signing of the act). The quality of major repairs and the living conditions of citizens during repairs are under close scrutiny by citizens and the media. In 2015, GOST R 56193–2014² was introduced. Immediately after the launch of the ARF Centre's "People's Expertise" programme, a practical guide was published on issues related to the organization of major repairs to com-

mon property³. Despite the transparency of the process of organizing major repairs and the attention paid to it by public organizations, the number of complaints from residents on the Moscow mayor's website is not decreasing⁴. Consequently, studying public opinion on this issue and making decisions to eliminate emerging problems is currently a pressing task.

One effective way to assess the quality of repairs is to conduct a public opinion poll. Previous studies have addressed general issues (awareness, participation in meetings on major repairs, fundraising) [1]. It has been noted that homeowners are sometimes unable (or unwilling) to influence the course of repairs [2, 3] or that their complaints are ignored by contractors [4]. At the same time, federal law regulates the procedure for compensating for harm caused to the life or health of individuals during major repairs⁵.

A review of foreign sources on the issue of major repairs to apartment buildings as the main focus of research revealed the topic of energy efficiency of the measures taken [5–7]. There are works devoted to the multi-criteria evaluation of contractors [8], as well as the development

¹ Major repairs to residential buildings. URL: <https://www.mos.ru/city/projects/kapremont/#>

² GOST R 56193–2014. Housing and communal services and management of apartment buildings. Major repair services for common property in apartment buildings. General requirements.

³ Control over the process of major repairs of common property: rights and opportunities of citizen-owners: practical guide. URL: <https://fondkr10.ru/assets/dokumenty/Informaciya-sobstvennikam/Publikacii-broshyury-pamyatki/Prakticheskoe-posobie-Kontrol-za-processom-kapitalnogo-remonta-obshego-imushchestva.pdf>

⁴ Sergey Sobyenin's personal blog. URL: <https://www.sobyenin.ru/program/ticket/512>

⁵ Urban Planning Code of the Russian Federation dated 29 December 2004 No. 190-FZ, Art. 60.

of models for estimating the time required for building repairs based on machine learning [9].

The authors of this study believe that in the current Russian context, the most objective assessment of the quality of major repairs and the development of ways to improve them can only be provided by a public opinion poll with a representative specimen of respondents. The aim of this study is to look at the problem of major repairs to multi-apartment buildings from the point of view of the end user — the residents of multi-apartment buildings during major repairs without relocation and after repairs. The survey revealed that the priority factor for residents of multi-apartment buildings of all ages and genders when assessing major repairs is the use of high-quality, non-toxic materials and the quality of finishing. For women of all ages, the cost of repairs was an important issue. Its importance for this group of respondents was almost on a par with the importance of the quality of materials. For the purpose of practical application of the results obtained, weighting coefficients for each factor studied were calculated for the total specimen of respondents, which made it possible to create a method for rapid assessment of the quality of major repairs from the point of view of the end user — residents of multi-apartment buildings — based on Harrington's verbal-numerical scales.

MATERIALS AND METHODS

The authors conducted a survey using the Delphi method, which is a method of forecasting and decision-making based on the anonymous collection of opinions from a group of experts (respondents). A distinctive feature of the Delphi method is its iterative process: experts (respondents) answer questions in several rounds, with each subsequent round building on the results of the previous one. The Delphi method is used in construction, for example, to assess critical factors influencing human errors related to design decisions [10]; to evaluate energy consumption systems [11]; to identify the main causes of accidents on construction sites [12]; assessing the risks of accidents on construction sites caused by worker fatigue [13]; researching the prospects for the construction of multi-storey wooden buildings [14]; and studying safety issues in small and medium-sized construction companies [15].

Justification for the number of respondents

The survey involved 160 residents of Moscow and the surrounding area aged between 18 and 75, including 47 women and 113 men. Mathematical statistics were used to determine whether the number of respondents was sufficient for the task at hand. The literature [16] provides a rule for calculating the minimum number of respondents (experts) m_{\min} depending on the permissible error value, according to which the following expression is valid:

$$m_{\min} = 0.5 \cdot \left(\frac{3}{\alpha} + 5 \right), \quad (1)$$

where α is the error of the analysis result, taking values from 0 to 1 (significance level). According to the data published in [16], expression (1) is most applicable when conducting a survey using the Delphi method. For a significance level of $\alpha = 0.05$ (confidence probability of 0.95) according to formula (1), the minimum number of respondents is 33; for a significance level of 0.01 (confidence probability of 0.99), the minimum number of respondents is 152.

It is clear that the number of experts who participated in the survey is sufficient ($m > m_{\min}$) at the highest confidence level.

Selection of factors to be evaluated

For the purpose of the initial survey, the following factors were selected, which respondents were asked to rank:

- compliance with repair work deadlines;
- cost of work performed;
- quality of finishing works;
- convenient organization of temporary storage of materials for residents;
- use of environmentally friendly, non-toxic materials;
- quality of lift equipment replacement.

The factors were selected based on considerations of time and cost, as well as ensuring safety during the overhaul.

RESEARCH RESULTS

Initial processing of survey results

The following rules were used when filling out the survey table: the most significant factor was assigned a rank of 1, and the least significant factor was assigned a rank of 6. If a respondent did not take one factor into account, the maximum rank value was taken as the assessment; if the respondent did not take several characteristics into account, they were assigned the same ranks, equal to the arithmetic mean of the remaining unused assessments. To assess the consistency of respondents' opinions, an alternative consistency coefficient was used [17, 18], which is a modification of Kendall's concordance coefficient as a multiple variant of rank correlation:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - 3m(2m(n+1) - 1) \cdot \partial(n, m)}; \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m r_{ik} - 0.5m(n+1) \right]^2;$$

$$\partial(n, m) = \begin{cases} 0, & \text{where } m(n+1) \text{ is even} \\ 1, & \text{where } m(n+1) \text{ is an odd number,} \end{cases}$$

where n is the number of factors.

Fig. 1 shows the distribution of rank sums across all specimen options considered. It is clear that in this survey, the minimum rank sum (the most significant

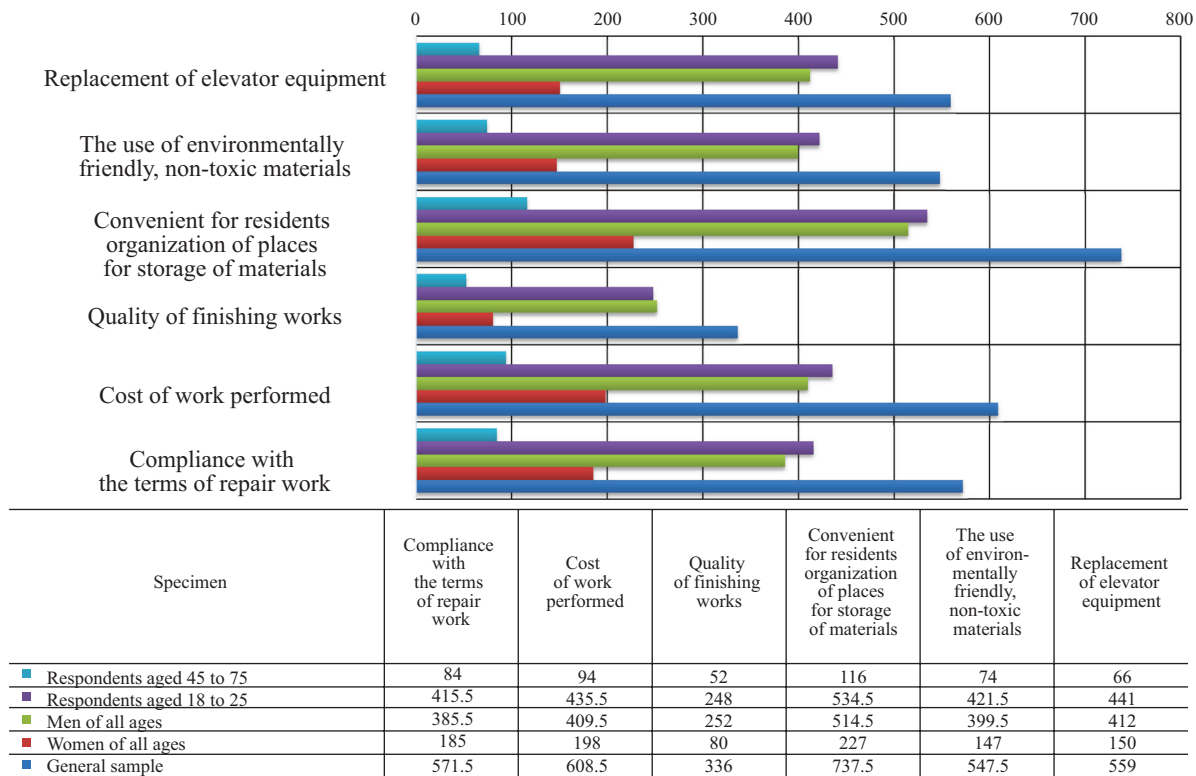


Fig. 1. Distribution of the sum of ranks by factors

factor) corresponds to the factor “Quality of finishing works”, and the maximum rank sum corresponds to the factor “Convenient organisation of temporary storage of materials for residents” (the least significant factor). Nevertheless, it would be incorrect to draw conclusions based on the results of this part of the study without assessing the significance of the calculated concordance coefficients.

The calculated values of the concordance coefficient for all respondent specimens are given in Table 1 (column 4). It is clear that, from a formal point of view, only one of the concordance coefficients (the “Women” specimen) corresponds to a satisfactory agreement among respondents (0.5). However, for surveys with a large number of respondents, this approach is incom-

plete (this issue is discussed further below). Therefore, the significance of the obtained concordance coefficient values is assessed according to two criteria: Pearson’s χ^2 and Fisher’s Z-criterion.

According to [16], the empirical value of Pearson’s criterion is determined by the expression:

$$\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W. \tag{3}$$

The number of degrees of freedom $\nu = n - 1$. For all specimens, the value of the degree of freedom is 5. Empirical values χ^2 in column 5 Table 1.

For Fisher’s Z-test, according to publication [16], the following value is used as the critical statistic:

$$Z = 0.5 \cdot \ln[(n + 1)W/(1 - W)]. \tag{4}$$

Table 1. Calculation of the significance of concordance coefficients

Specimen	m	n	W according to expression (2)	χ^2 according to formula (3)	χ^2 criterion value	Z according to expression (4)	v_1	v_2	Z criterion value
							according to formula (5)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Total specimen of respondents	160	6	0.19	152.00	11.07 (significance level 0.05) 15.07 (significance level 0.01)	0.25	5	795	2.2 (significance level 0.05) 2.8 (significance level 0.01)
Women of all ages	47	6	0.51	119.85		0.99	5	230	
Men of all ages	113	6	0.16	90.40		0.14	5	560	
Respondents aged 18 to 25 inclusive	119	6	0.17	101.15		0.18	5	590	
Respondents aged 45 to 75 inclusive	23	6	0.27	31.05		0.48	5	110	

Table 2. Grouping of factors

Factors	Combined groups of factors
Compliance with repair work deadlines	Organization of major repairs (duration, deadlines, storage of materials)
Convenient organization of temporary storage of materials for residents	
Cost of work performed	Cost of major repairs (including costs of materials and lift equipment)
Quality of lift equipment replacement	
Quality of finishing works	Quality of finishing works and materials used
Use of environmentally friendly, non-toxic materials	

The degrees of freedom of statistic (4) according to [16] are calculated for the task of determining significance as:

$$v_1 = n - 1; v_2 = (m - 1) \cdot v_1. \tag{5}$$

The calculated data are entered in Table 1, columns 7–9.

Since, according to Table 1, for all specimens, the empirical value of χ^2 is greater than the criterion value even for a significance level of 0.01, the opinions of experts at this significance level can be considered consistent in all specimens considered. A similar result was shown by the analysis of data using Fisher’s criterion.

Second round of research. Grouping of factors

Next, in accordance with the ideology of the survey method used, the factors were grouped (Table 2) into three groups, conditionally designated as “Organization of major repairs”, “Cost of major repairs” and “Quality of finishing works and materials used”, hereinafter referred to as “Organization”, “Cost,” and “Quality.”

The results of the statistical processing of the second round are shown in Table 3 and Fig. 2.

For practical application of the results obtained, weight coefficients for each factor studied were calculated for the total specimen of respondents: “Organization” — 0.165, “Cost” — 0.335, “Quality” — 0.500.

Practical application of the results obtained to assess the quality of major repairs in multi-apartment buildings

As a small example, let us consider a survey in a multi-apartment building in Moscow after major repairs were carried out. The respondents are residents of the building of all ages and genders. The following

factors were assessed: “Organization of major repairs (duration, deadlines, storage of materials)”, “Quality of finishing works and materials used”, and “Cost of major repairs (including the cost of materials and lift equipment)”. The assessment was carried out on a 10-point scale, with the highest score being 10 and the lowest being 1. The average score for the completed survey for the “Organization” factor was 3.2, for the “Quality” factor was 4.8, and for the “Cost” factor was 9.5. A comprehensive assessment of the major repairs carried out is required.

To solve the problem, we use Harrington’s generalized preference function, which is used to formalize subjective uncertainties in multi-criteria problems, for example, to evaluate the effectiveness of occupational safety measures [19, 20]. The desirability index ranges from 0 (worst) to 1 (best). Individual indices can range from 2 to 5 (Fig. 3). The formula describing Harrington’s “desirability curve” is:

$$d = \exp[-\exp(-Y)], \tag{6}$$

defines a function with two saturation regions (at $d \rightarrow 0$ and $d \rightarrow 1$) and a linear region between them. Y is a dimensionless quantity related to the value of the natural factor by a linear law:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot Y_n, \tag{7}$$

where Y_n are natural factors, in this case the average scores obtained from the survey.

The Y -axis is a scale of individual indicators, and the d -axis is a desirability scale. The desirability scale is divided into five sub-ranges from 0 to 1: [0; 0.20] — “very poor”; [0.20; 0.37] — “poor”; [0.37; 0.63] — “satisfactory”; [0.63; 0.80] — “good”; [0.8; 1.00] — “very good”.

Table 3. Results of expert agreement in the second round

Specimen	m	n	W by expression (2)	Pearson’s confidence probability	Significance level
Total specimen of respondents	160	3	0.77	0.99	0.01
Women of all ages	47	3	0.66	0.99	0.01
Men of all ages	113	3	0.71	0.99	0.01
Respondents aged 18 to 25 inclusive	119	3	0.73	0.99	0.01
Respondents aged 45 to 75 inclusive	23	3	0.80	0.99	0.01

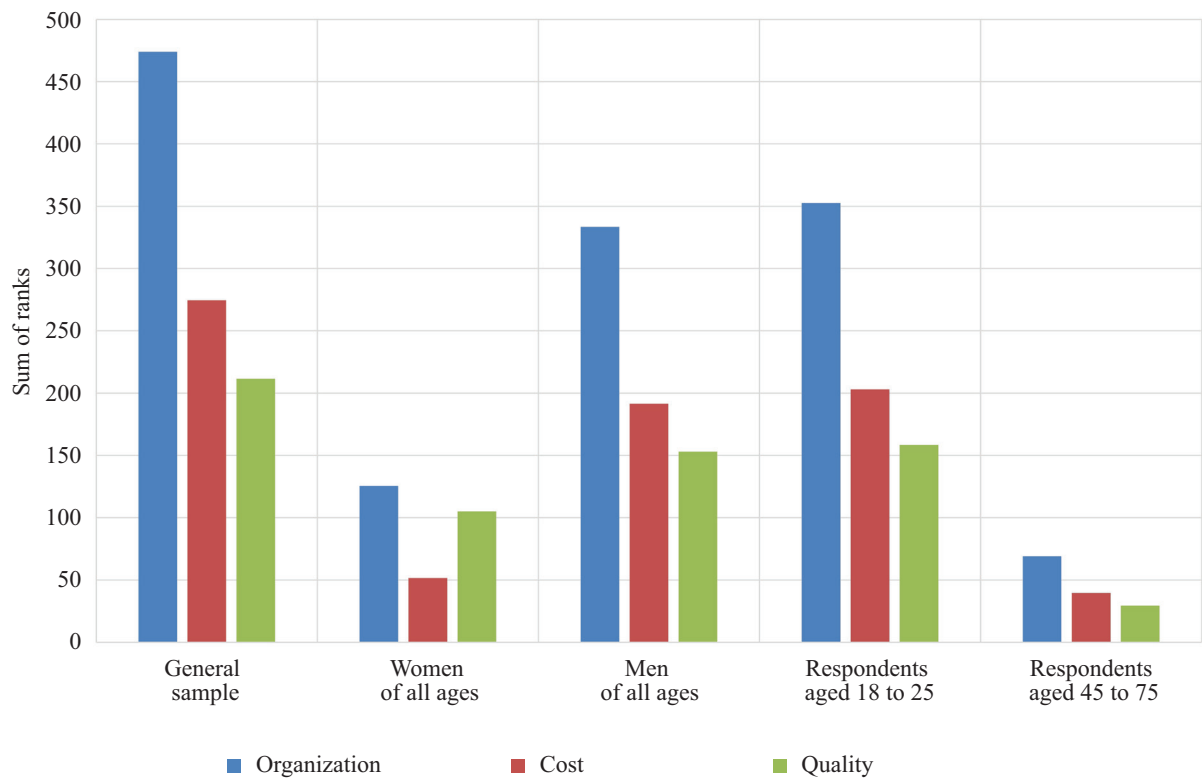


Fig. 2. Calculated values of rank sums

Substituting the reference values of the preference scale d into equation (6), we obtain the following expressions: $1 = \exp[-\exp(-Y_0)]$; $0.80 = \exp[-\exp(-Y_1)]$; $0.63 = \exp[\exp(-Y_2)]$; $0.37 = \exp[-\exp(-Y_3)]$; $0.20 = \exp[-\exp(-Y_4)]$. After double logarithmation: $Y_0 = 5.0000$; $Y_1 = 1.5000$; $Y_2 = 0.7725$; $Y_3 = 0.0057$; $Y_4 = -0.475$; $Y_5 = -2.0000$. Substituting the extreme values of the Y scale (maximum and minimum desirability d) into expression (7), we obtain a system of equations:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot Y_{\text{H max}} = 5; \\ a_0 + a_1 \cdot Y_{\text{H min}} = -2. \end{cases}$$

Solving the system of equations, substituting the maximum number of points possible under the condi-

tions of the survey (10) for $Y_{\text{H max}}$ and the minimum number of points possible (1) for $Y_{\text{H min}}$, we obtain the formula for converting natural parameters into partial desirability:

$$d = \exp(-\exp(-(-2.78 + 0.78 \cdot Y_n))). \tag{8}$$

The results of the calculations are summarized in Table 4.

Taking into account the weight coefficients, we obtain the following generalized result:

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{k_i} = 0.99^{0.335} \cdot 0.68^{0.5} \cdot 0.26^{0.165} = 0.66.$$

The value obtained corresponds to the “Good” indicator.

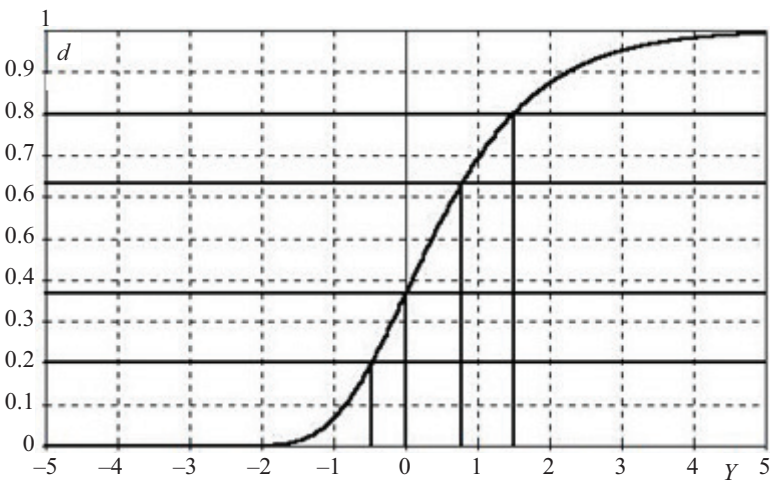


Fig. 3. Graphical representation of the left branch of the Harrington preference function with a one-sided restriction

Table 4. Particular preferences according to Harrington

Factor	Average score in the survey Y_n	Weighting coefficients k_i	Y	d according to expression (8)	Verbalization of the values of particular preferences
Cost	9.5	0.335	4.630	0.99	Very good
Quality	4.8	0.500	0.963	0.68	Good
Organization	3.2	0.165	−0.284	0.26	Poor

CONCLUSION AND DISCUSSION

Analysis of the survey data revealed a number of interesting trends. Both stages showed (Fig. 1, 2) that the issue of convenience for residents during major repairs to multi-family buildings is not a priority for the residents themselves. Residents of all ages and genders are willing to put up with inconveniences during the repair process. The priority is the use of high-quality, non-toxic materials and the quality of the finish. For women of all ages, the cost of the repairs was an important issue. Its relevance for this group of respondents is practically on a par with the quality of materials. This is because it is women who control household expenses and ensure that the funds allocated for major repairs are spent in a targeted manner.

The survey allowed us to calculate the weighting coefficients of the factors, which led to the creation of a methodology for the rapid assessment of major repairs in multi-apartment buildings based on a statistical approach. For the practical application of the results obtained, the weighting coefficients of each factor studied were calculated for the total specimen of respondents: “Organization” — 0.165; “Cost” — 0.335; “Quality” — 0.5, which made it possible to create a method for rapid assessment of the quality of capital repairs

from the point of view of the end user — residents of multi-apartment buildings — based on Harrington’s verbal-numerical scales.

Processing of the survey results showed that in order to assess the reliability of surveys conducted using the Delphi method, it is necessary to focus on achieving greater confidence probability, and not just on the value of the concordance coefficient.

Studying public opinion at the next level will make it possible to identify current issues in the implementation of major repairs (justification and preparation of work plans, selection of effective and acceptable technological solutions, etc.), as well as to supplement existing regulatory documents^{6, 7, 8}.

The methodological foundations of this study were partially reported at the international symposium “The future of the construction industry: challenges and development prospects” [21].

⁶ MDK 2-03.2003. Rules and standards for the technical operation of the housing stock.
⁷ CP 368.1325800.2017. Residential buildings. Rules for the design of major repairs.
⁸ VSN 41-85(r). Instructions for the development of projects for the organization and production of major repairs of residential buildings.

REFERENCES

1. Tsybikova D. Participation of the owners in matters of major overhaul in the apartment buildings. RSUH/RGGU Bulletin. Series: Philosophy. Sociology. Art Studies. 2017; 2(8):46-56. EDN ZIDMFL. (rus.).

2. Ermishina A.V. Digitalization in the organizing of apartment building major renovation in Russia. Journal of Economic Regulation. 2022; 13(4):108-115. DOI: 10.17835/2078-5429.2022.13.4.108-115. EDN QESXBV. (rus.).

3. Kakadiy V.I., Kakadiy I.I. Managing the system of major repairs of apartment buildings. The Eurasian Scientific Journal. 2020; 12(2):43. EDN RZKFCH. (rus.).

4. Khmeleva G.A., Trifonova D.Yu. State control of capital repair of multi-apartment houses, problems and methods of their solution. Bulletin of Science and Education. 2019; 10-4(64):38-40. EDN MYWELD. (rus.).

5. Niemela T., Kosonen R., Jokisalo J. Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings. Energy and Buildings. 2017; 137:60-75. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.031

6. Gram-Hanssen K., Bonderup S., Aagaard L.K., Møller Askholm M.A. Energy justice in heat metering: Findings from a Danish experiment of metering and distribution in residential apartment buildings. Energy Research & Social Science. 2023; 104:103250. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103250

7. Choi J., Kim J. Techno-economic feasibility study for deep renovation of old apartment. Journal of Cleaner Production. 2023; 382:135396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135396

8. Zavadskas E.K., Vilutiene T. A multiple criteria evaluation of multi-family apartment block’s maintenance contractors: I-Model for maintenance contractor

evaluation and the determination of its selection criteria. *Building and Environment*. 2006; 41(5):621-632. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.02.019

9. Kwon N., Ahn Y., Son B.S., Moon H. Developing a machine learning-based building repair time estimation model considering weight assigning methods. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:102627. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102627

10. Sarvari H., Baghbaderani A.B., Chan D.W.M., Beer M. Determining the significant contributing factors to the occurrence of human errors in the urban construction projects: A Delphi-SWARA study approach. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024; 205:123512. DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123512

11. Kajjoba D., Wesonga R., Olupot P.W., Kirabira J.B., Lwanyaga J.D., Kasedde H. Prioritizing sustainability indicators for Uganda's Built Environment: Expert perspectives using the Delphi technique. *Results in Engineering*. 2024; 24:103182. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103182

12. Mohandes S.R., Sadeghi H., Fazeli A., Mahdiyar A., Hosseini M.R., Arashpour M. et al. Causal analysis of accidents on construction sites: A hybrid fuzzy Delphi and DEMATEL approach. *Safety Science*. 2022; 151:105730. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105730

13. Yusoff H.M., Heng P.P., Illias M.R., Karrupayah S., Fadhli M.A., Hod R. A qualitative exploration and a Fuzzy Delphi validation of high-risk scaffolding tasks and fatigue-related safety behavioural deviation among scaffolders. *Heliyon*. 2024; 10(15):e34599. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34599

14. Hurmekoski E., Pykäläinen J., Hetemäki L. Long-term targets for green building: Explorative Delphi backcasting study on wood-frame multi-story construc-

tion in Finland. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:3644-3654. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.031

15. Bachar R., Urlainis A., Wang K.-C., Shohet I.M. Optimal allocation of safety resources in small and medium construction enterprises. *Safety Science*. 2025; 181:106680. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106680

16. Arab-Ogly E.A., Bestuzhev-Lada I.V., Gavrilov N.F. et al. *Workbook on forecasting*. Moscow, Mysl, 1982; 430. (rus.).

17. Popov G.A., Popova E.A. Alternative of coefficient of concordance. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2013; 2:158-167. EDN QJBSGT. (rus.).

18. Popov G.A., Popova E.A. Asymptotic behavior of alternative of concordance coefficient. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2014; 1:153-160. EDN RUDUIL. (rus.).

19. Fomina E.E., Kuzminova A.S. Performance assessment methodology of occupational health and safety management system. *Occupational Safety in Industry*. 2024; 8:77-83. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-77-83. EDN RYLXRK. (rus.).

20. Poroshin A.A., Bobrinev E.V., Udavtsova E.Yu., Kondashov A.A. Dynamic model for assessing the state of the occupational health and safety management system: application of the Bayesian approach. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 9:26-30. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-26-30. EDN ZGJSGS. (rus.).

21. Kornilova A., Ermakov V., Baulin A. Methodological approaches to the assessment of public opinion during the overhaul of apartment buildings. *E3S Web of Conferences*. 2023; 457:02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202345702051

Received November 29, 2024.

Adopted in revised form on December 5, 2024.

Approved for publication on December 12, 2024.

B I O N O T E S: **Anna V. Kornilova** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Professor, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; SPIN-code: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; KornilovaAV@mgsu.ru;

Valentin A. Ermakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru;

Aleksei V. Baulin — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, 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; ID RSCI: 270399, Scopus: 57217598258, ResearcherID: AFO-0397-2022, ORCID: 0000-0003-2874-6704; BaulinAV@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of 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 677.076:624.138.9

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок – щебень»

Алексей Александрович Игнатьев¹, Илья Александрович Чижиков²

¹ *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ); г. Москва, Россия;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты экспериментальных исследований инновационной 3D-георешетки в сравнении с традиционно выпускаемыми плоскими георешетками Славрос СД-40 и Армосет Б, применяемыми для армирования грунтовых оснований. В ходе экспериментальных исследований оценивались повреждаемость георешеток при воздействии уплотняющей нагрузки, разделяющая функция георешеток и заклинивающая способность.

Материалы и методы. Заклинивающая способность, разделяющая функция и устойчивость к разрушению готовых образцов георешеток оценивались в лабораторных условиях с применением разработанной конструкции испытательного контейнера, который представляет собой металлическую коробку размерами 20 × 20 × 20 см и металлическую крышку размерами 19,5 × 19,5 × 10,5 см с толщиной стенок 5 мм. В качестве пресса для моделирования уплотняющей установки использовалась гидравлическая установка ЗИМ П-10.

Результаты. Результаты испытаний на повреждаемость показали, что образцы георешетки Армосет Б и Славрос СД-40 получили многочисленные повреждения в виде разрушения ребер, вмятин и перегибов отдельных стренг. Исходя из общего количества повреждений и характера повреждения уложенного слоя бумаги в качестве индикатора заклинивание каменного материала минимально, наблюдаются характерные разрывы на листе и заметно проникновение каменного материала через армируемую георешетку. Для 3D-георешетки, исходя из количества повреждений на слое бумаги, можно говорить о достаточном и высоком проценте заклинивания каменного материала. Георешетка отлично справилась с функцией разделения слоев рыхлого песка и щебня. Заклинивание каменного материала происходит выше слоя армирования, что очень важно для армирующих прослоек и повышения эффективности армирования слоев.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований с разработанной конструкцией инновационной 3D-георешетки продемонстрировали, что георешетка имеет значительные перспективы для применения ее в качестве армирующей прослойки в гражданском строительстве. Требуется проведение более масштабных экспериментальных исследований для оценки эксплуатационной эффективности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: георешетка, заклинивающая способность, щебень, песок, разделение слоев, повреждаемость георешеток, уплотнение

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментальных исследований Эскандеру Алишеровичу Рустамову и Кристине Андреевне Куликовой, а также рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Игнатьев А.А., Чижиков И.А. Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок – щебень» // Строительство: наука и образование. Т. 15. Вып. 3. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Автор, ответственный за переписку: Алексей Александрович Игнатьев, ignatievaa@rosdornii.ru.

Assessment of damage and jamming ability of innovative 3D geogrid at the sand – crushed stone interface

Aleksey A. Ignatyev¹, Il'ya A. Chizhikov²

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents comparative results of experimental studies of innovative 3D geogrids in comparison with traditionally produced flat geogrids Slavros SD-40 and Armoset B, used for reinforcement of soil foundations. Damageability of geogrids under compaction load, separating function of geogrids and wedging ability were evaluated during experimental studies.

Materials and methods. The wedging ability, separating function and resistance to failure of ready-made geogrids samples were evaluated in laboratory conditions using the developed design of a test container, which is a metal box with dimensions 20 × 20 × 20 cm and a metal lid with dimensions 19.5 × 19.5 × 10.5 cm with a wall thickness of 5 mm. A ZIM P-10 hydraulic machine was used as a press to simulate the sealing unit.

Results. Damage test results showed that the Armoset B and Slavros SD-40 geogrid specimen sustained numerous damages in the form of rib failures, indentations and kinking of individual strands. Based on the total amount of damage and the nature of damage to the laid paper layer, as an indicator, the jamming of the stone material is minimal, characteristic tears on the sheet are observed and the penetration of the stone material through the reinforced geogrid is noticeable. For 3D geogrid, based on the number of damages on the paper layer, we can speak about a sufficient and high percentage of stone material jamming. The geogrid perfectly coped with the function of separation of loose sand and crushed stone layers. The jamming of stone material occurs above the reinforcement layer, which is very important for reinforcing interlayers and increasing the efficiency of reinforcement layers.

Conclusions. The results of experimental studies with the developed design of innovative 3D geogrid showed that this geogrid has significant prospects for its application as a reinforcing interlayer in civil engineering. More extensive experimental studies are required to assess the operational efficiency.

KEYWORDS: geogrid, jamming capacity, crushed stone, sand, layer separation, geogrid damage, compaction

Acknowledgements. The authors express their gratitude for assistance in conducting experimental studies to Eskander Alisherovich Rustamov and Kristina Andreevna Kulikova, as well as to the reviewers.

FOR CITATION: Ignatyev A.A., Chizhikov I.A. Assessment of damage and jamming ability of innovative 3D geogrid at the sand – crushed stone interface. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Corresponding author: Aleksey A. Ignatyev, ignatievaa@rosdornii.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях строительства широкое применение находят такие геосинтетические материалы, как георешетки. Они активно используются при укреплении грунтовых оснований под различные фундаменты, для повышения несущей способности слабых грунтов, разделения слоев. В дорожном строительстве георешетки активно применяются для увеличения несущей способности оснований дорожных одежд и колееустойчивости дорожных одежд [1], а также для уменьшения толщины конструктивных слоев. Кроме того, армирование грунтовых оснований направлено на повышение долговечности конструкций.

Сегодня на рынке геосинтетических материалов представлено большое разнообразие конструкций георешеток. В основном их отличие заключается в форме и размерах ячейки, технологии и способах производства (плетеные или сварные), в используемых материалах. Основная форма ячеек квадратная и треугольная, размеры колеблются от 20 до 50 мм. Есть и другие уникальные решения. При этом для до-

рожного строительства широкое применение нашли георешетки, используемые с целью армирования асфальтобетонных слоев, выполненные из базальтового или стекловолокна. Они укладываются между слоями асфальтобетона при температурах выше 120 °С, что обеспечивает их устойчивость в ходе укладки и последующей эксплуатации.

Стоит отметить, что в основном георешетки выпускаются производителями плоскими, продиктовано это необходимостью уменьшения толщины прослойки и снижением материалоемкости. Это имеет и свои недостатки. В частности, за счет малой толщины уменьшается глубина погружения в слой и несколько снижается адгезия между слоями, а также сокращается армирующая способность. Возможен сдвиг между слоями, при котором повреждения георешетки приводят к значительному снижению ее прочности [2], тем самым нарушается требуемая монолитность и, как следствие, наступает быстрое разрушение покрытия. Говоря о разделяющей функции георешеток, когда их применяют для разделения слоев (например, «песок – щебень»), то рассчитыва-

ют на возможность заклинивания каменного материала и стабилизацию его свойств в процессе последующей эксплуатации и на минимизацию возможного взаимного проникновения слоев друг в друга. Важно, чтобы каменный материал не проникал в песчаные слои и сохранялись проектные толщины слоев, а также пористость каменного материала не компенсировалась бы проникающим в поры песчаным грунтом. Добиться этого можно только в том случае, если георешетка обеспечивает достаточную заклинивающую способность каменного материала, при которой щебень не просачивается сквозь ячейки и обеспечивает надежное удержание каменного материала в нижних слоях. Именно здесь проявляются основные недостатки плоских георешеток. Плоская поверхность не позволяет надежно удерживать колотый камень (щебень), что способствует срыву его с поверхности. Также для обеспечения заклинивания требуется, чтобы размер ячейки соответствовал размеру каменного материала. Есть рекомендации, по которым размер ячейки не должен превышать двух размеров самой большой фракции щебня.

В последнее время в отечественной и зарубежной практике активно стали обсуждать повреждаемость георешеток, уложенных между слоями каменного материала или слоями песка и каменного материала. Результаты в ряде случаев неутешительны [3–5]. Причем повреждаемость напрямую зависит от материала, из которого изготавливается георешетка [6]. Георешетки, полученные экструзионным методом, более устойчивы к ударным нагрузкам и истиранию, но за счет стремления производителей сэкономить материал при производстве толщины ребер сильно уменьшаются, что приводит к их более высокой повреждаемости, о чем говорят исследования, направленные на численное моделирование разрушения ребер георешеток [7–9]. Порой [3] износ может достигать 90 % от первоначальной прочности, что практически сводит на нет все возложенные на георешетку обязательства по укреплению и армированию слоев. Не менее актуальным аспектом является и стойкость к воздействию природных факторов. В ряде работ этому уделено особое внимание. Так, воздействие ультрафиолета и температуры [10–12] может еще до укладки георешетки уменьшить ее прочность более чем на 50 %. Безусловно, и культура производства работ оказывает значительное влияние на последующие эксплуатационные характеристики объекта. При укладке георешеток любые перекосы, умышленное изменение геометрии приводят к тому, что георешетка изменяет свои характеристики и более активно подвержена повреждаемости и снижению эксплуатационных параметров [2]. Кроме того, на георешетку, уложенную на подготовленную поверхность, из самосвала выгружается щебень, что при высоте более 1 м вызывает существенные повреждения и даже разрушение. Изучению этому эффекту посвящено ис-

следование [13], в котором рассмотрено повреждение георешеток при падении каменного материала с высоты 1 и 2 м. Результаты исследований показали, что однородность размера каменного материала оказывает наибольшее влияние на повреждаемость георешеток. А в практике строительства именно однородность каменного материала нашла наиболее широкое применение. Смеси из каменных материалов используются значительно реже. Все это создает определенные сложности для производства работ. При этом важно и то, что щебень имеет ровную поверхность, которая достаточно легко перерезает или перерубает отдельные ребра георешетки.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению особенностей армирования конструктивных слоев и оснований [14–18] и оценке повреждаемости георешеток, расположенных между слоями каменного материала или слоями песка и щебня, исследований, направленных на оценку заклинивающей способности, практически нет. А этот фактор является одним из важнейших с точки зрения повышения несущей способности и уменьшения толщины конструктивного слоя, а также снижения эффекта взаимного проникновения слоев друг в друга.

На протяжении ряда лет коллективом авторов проводятся исследования по изучению особенностей армирования оснований инновационной 3D-георешеткой [19, 20]. Результаты уникальны как в части армирующей способности, так и заклинивающей способности каменного материала. Исследования продолжаются в этом направлении. В рамках данной публикации будут представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на сравнение георешеток по повреждаемости и заклинивающей способности при укладке их между слоями песка и каменного материала.

Предложен новый способ оценки заклинивающей способности каменного материала, который предполагает укладку листа бумаги в качестве индикатора. Уникальность этого способа состоит в том, что он позволяет наглядно увидеть разницу при сравнении нескольких георешеток на заклинивающую способность и насколько эффективно георешетка удерживает каменный материал от его проникновения в песчаные слои.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Заклинивающая способность, разделяющая функция и устойчивость к разрушению готовых образцов георешеток, включая инновационную 3D-георешетку, оценивались в лабораторных условиях.

Цель эксперимента заключалась в необходимости оценки георешеток различной конструкции и материала в процессе уплотнения на границе слоев «песок – щебень» с последующим сравнением их механической устойчивости к разрушению

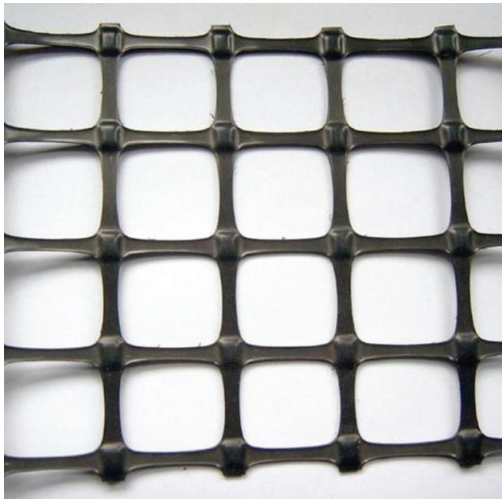


Рис. 1. Экструдированная георешетка Славрос СД-40

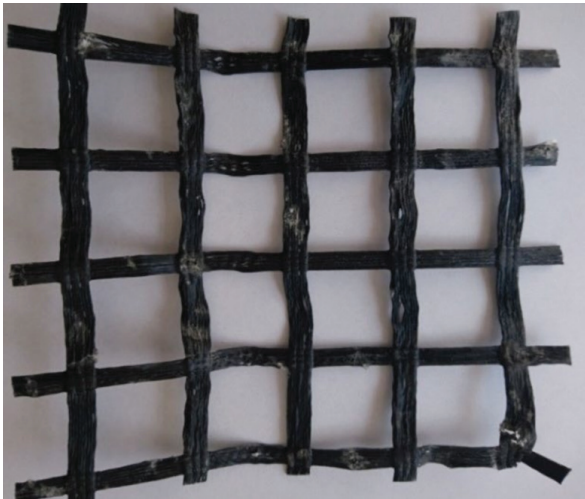


Рис. 2. Тканая георешетка Армосет Б

под повторяемой статической нагрузкой и заклинивающей способности.

Для эксперимента были отобраны следующие образцы георешеток:

1. Экструдированная георешетка Славрос СД-40 с ячейкой 40 × 40 мм (рис. 1).

В табл. 1 представлены физико-механические показатели георешетки СД-40.

2. Тканая георешетка Армосет Б с ячейкой 30 × 30 мм (рис. 2).

В табл. 2 приведены физико-механические показатели георешетки Армосет Б.

3. Инновационная 3D-георешетка для армирования дорожной одежды с размером по диагонали 70 мм (рис. 3).

Характеристики георешетки: материал — Petg; диаметр отверстия — 63 мм; высота ребра — 8 мм; ширина ребра — 10 мм.

Георешетка для армирования дорожной одежды представляет собой конфигурацию ячеек треугольной формы, образованных пересечением ребер. Конфигурация ячеек образует правильный шестиугольник.

Суть испытания заключалась в моделировании технологии укладки георешетки и механическом повреждении ее вследствие контакта с каменным материалом в процессе уплотнения.

Для испытаний использовалась гидравлическая установка ЗИМ П-10, которая состояла из нагрузочной плиты, испытательного контейнера и силовой установки, создающей требуемое давление (рис. 4).

Табл. 1. Физико-механические показатели георешетки Славрос СД-40

Показатель	Значение
Нагрузка при растяжении, кН/м, не менее:	
• при нормируемой нагрузке вдоль/поперек;	40/40
при относительном удлинении:	13/13
• 2 % вдоль/поперек;	26/26
• 5 % вдоль/поперек	
Размер ячейки, длина/ширина, мм	40/40
Перекося ячейки, градусы	±3
Ширина рулона, м, не более	4
Длина рулона ±1 %, м	50

Табл. 2. Технические характеристики Армосет Б

Показатель	Значение
Нагрузка при растяжении, кН/м, не менее:	
• при нормируемой нагрузке вдоль/поперек;	50/50
при относительном удлинении:	12,5/12,5
• 3 % вдоль/поперек	
Размер ячейки, длина/ширина, мм	42 ± 2/42 ± 2
Перекося ячейки, градусы	Не нормировано
Ширина рулона, м, не более	5,2 ± 0,1
Длина рулона ±1 %, м	100



Рис. 3. Инновационная 3D-георешетка для армирования дорожной одежды

Эксперимент

Для проведения испытаний был изготовлен испытательный контейнер, который представляет собой металлическую коробку размерами $20 \times 20 \times 20$ см и металлическую крышку размерами $19,5 \times 19,5 \times 10,5$ см (рис. 5) с толщиной стенок 5 мм.

С целью изучения особенностей армирования, оценки заклинивающей способности, а также оценки функции разделения слоев производилось три вида испытаний:

1) на границе слоев «рыхлый песок (не уплотненный — естественного насыпания) — бумага — щебень»;

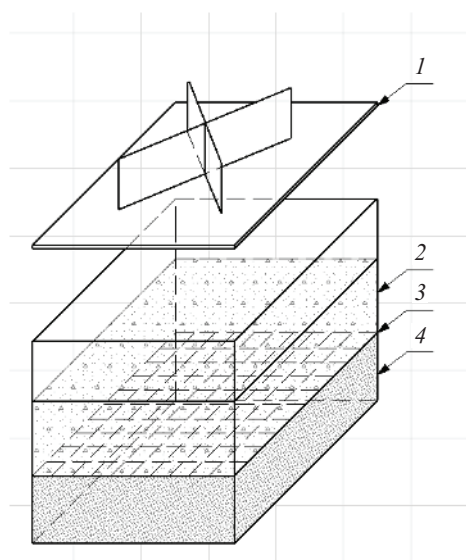


Рис. 5. Испытательный контейнер (металлическая коробка): 1 — металлическая крышка; 2 — слой основания (гранитный щебень М1000 фракции 20–40 мм); 3 — разделяющий слой из георешетки и листа белой бумаги в качестве индикатора для оценки заклинивающей способности каменного материала; 4 — дополнительный слой основания — песок средней крупности



Рис. 4. Гидравлическая установка ЗИМ П-10

2) на границе слоев «уплотненный песок (коэффициент уплотнения 0,93–0,95) — бумага — щебень»;

3) на границе слоев «уплотненный песок (коэффициент уплотнения 0,98) — бумага — щебень».

Для каждого вида испытаний отобрано по три образца исследуемых георешеток.

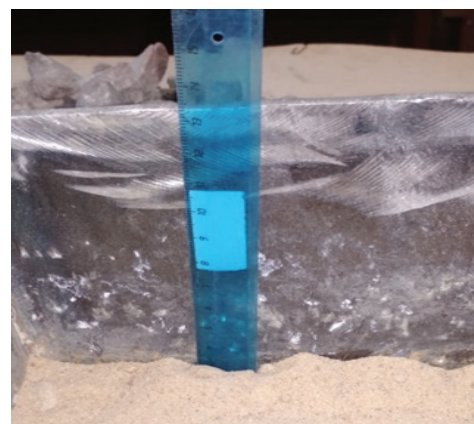


Рис. 6. Подготовленное основание из песка средней крупности



Рис. 7. Уложенный слой щебня на песчаный слой, слой бумаги и испытываемую георешетку

На дно испытательного контейнера (рис. 6) укладывался слой гранулированного материала (песок средней крупности) толщиной от 30 до 40 мм. В первом испытании слой песка не уплотнялся. Во втором испытании песок уплотнялся нагрузочной плитой до коэффициента уплотнения 0,93–0,95. В третьем испытании для уплотнения, помимо воздействия нагрузочной плиты, были обеспечены оптимальная влажность 8–9 % и доведение коэффициента уплотнения до 0,98.

Затем на подготовленном основании располагался лист белой бумаги, который в процессе проведения испытаний позволял определить процент заклинивания щебня и эффективность заклинки. Таким образом, он выступал в роли индикатора.

Георешетка размещалась на подготовленном основании в центре контейнера и засыпалась слоем щебня М1000 фракции 20–40 мм толщиной от 60 до 70 мм (рис. 7).

В процессе одного испытания через нагрузочную плиту три раза прикладывалась нагрузка 80 кН и выдерживалась в течение 30 с.

Далее образец извлекался и выполнялись визуальная оценка и фиксация повреждений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний на границе слоев «рыхлый песок – бумага – щебень».

1. Георешетка Армосет Б.

На дно испытательного контейнера укладывался слой рыхлого песка толщиной от 30 до 40 мм. Далее укладывался слой из бумаги, георешетка Армосет Б и сверху засыпался щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 8 представлены результаты испытаний.

По результатам первого испытания видно, что образец георешетки Армосет Б получил многочисленные повреждения в виде вмятин и перегибов отдельных стренг. Разрушения узлового соединения отсутствуют, есть только деформации.

Исходя из общего количества повреждений и характера повреждения уложенного слоя бумаги, заклинивание каменного материала минимально, наблюдаются характерные разрывы на листе и заметно проникновение каменного материала через армируемую георешетку. Это может означать, что георешетка Армосет Б недостаточно справляется с функцией разделения слоев дорожной одежды.

Количество повреждений в целом небольшое (отмечено до 10 характерных визуальных повреждений). Можно отметить, что фракция 20–40 мм минерального заполнителя оказывает существенное влияние на повреждаемость георешетки. Чем меньше фракция минерального заполнителя и чем тщательнее подобран гранулометрический состав, тем

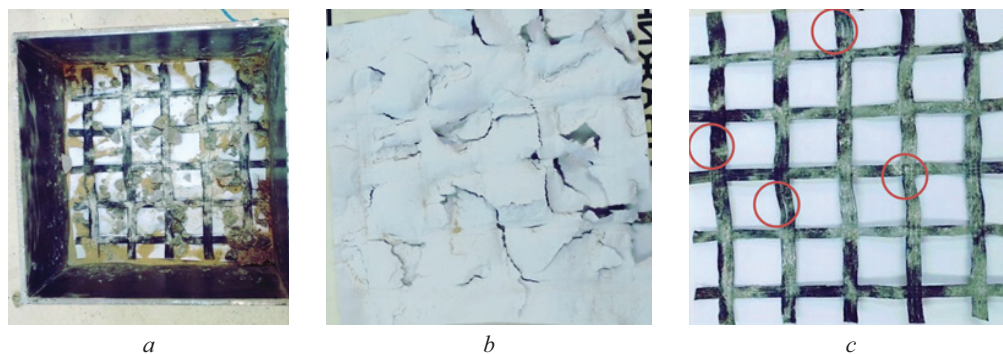


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований Армосет Б: а — общее состояние армируемой георешетки на слое рыхлого песка; б — состояние индикатора заклинки (бумага); в — повреждение извлеченной георешетки Армосет Б

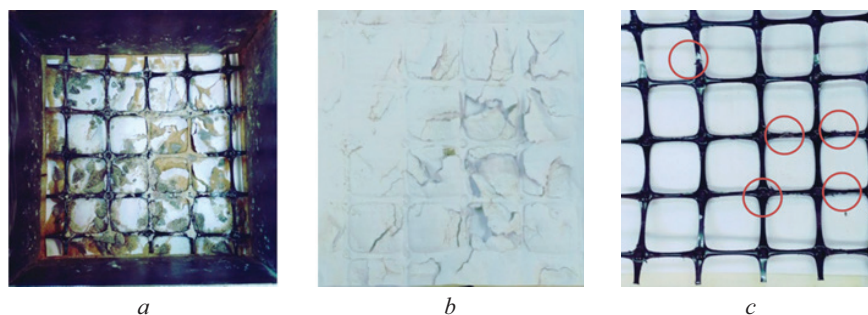


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований Славрос СД-40

меньше повреждаемость георешетки. Оценивая заклинивающую способность георешетки, заметим, что после уплотнения каменный материал достаточно легко извлекался без прикладывания усилий, что говорит о невысокой заклинивающей способности данной георешетки.

2. Славрос СД.

На дно испытательного контейнера укладывался рыхлый песок толщиной от 30 до 40 мм, далее шел слой из белой бумаги, георешетка Славрос СД и щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 9 представлены результаты испытаний георешетки Славрос СД-40.

По результатам первого испытания видно, что образец георешетки Славрос СД-40 получил многочисленные повреждения в виде разрушения отдельных стренг и узловых соединений. Исходя из количества повреждений на слое бумаги процент заклинивания каменного материала георешеткой низкий и недостаточный. Характер разрывов на бумаге показывает, что георешетка Славрос СД недостаточно справляется с функцией разделения слоев дорожной одежды. Наблюдается значительное проникновение каменного материала в слой песка при том, что размер ячейки — 40 мм, а самая малая фракция каменного материала — 20 мм, самая большая — 40 мм.

На георешетке Славрос СД присутствуют повреждения в виде раздавливания ребра, которые сконцентрированы вблизи узловых соединений. Расщепления узловых соединений не отмечается. Ребра получили существенные повреждения, которые определенно сказались на их прочности. Оценивая заклинивающую способность георешетки,

стоит заметить, что после уплотнения каменный материал достаточно легко извлекался без прикладывания усилий, что говорит о невысокой заклинивающей способности данной георешетки.

3. Инновационная 3D-георешетка.

На дно испытательного контейнера укладывался слой рыхлого песка толщиной от 30 до 40 мм, далее шел слой из белой бумаги, инновационная 3D-георешетка и щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 10 приведены результаты испытаний.

Исходя из количества повреждений на слое бумаги, можно говорить о достаточном и высоком проценте заклинивания каменного материала. Это показывает, что 3D-георешетка отлично справилась с функцией разделения слоев рыхлого песка и щебня. Заклинивание каменного материала происходит выше слоя армирования, что очень важно для армирующих прослоек и повышения эффективности армирования слоев. При таком эффекте можно смело говорить о возможности уменьшения толщины слоя каменного материала за счет высокой заклинивающей способности георешетки.

На инновационной 3D-георешетке присутствуют минимальные повреждения в виде небольших углублений. Перегибов и деформации конструкции георешетки нет. Расщепления узловых соединений не произошло. В целом повреждения характеризуются как незначительные и не оказывают влияния на прочность геосинтетического материала. Также в процессе извлечения слоя основания из гранитного щебня произошло надежное заклинивание щебня в ячейках, которые имеют размеры более чем в 3 раза превышающие минимальную фракцию щебня (60 мм) (рис. 11).

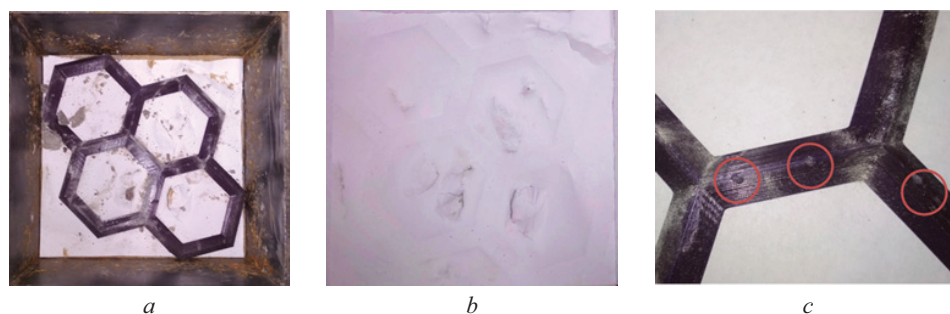


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований инновационной 3D-георешетки



Рис. 11. Заклинивание каменного материала в инновационной 3D-георешетке

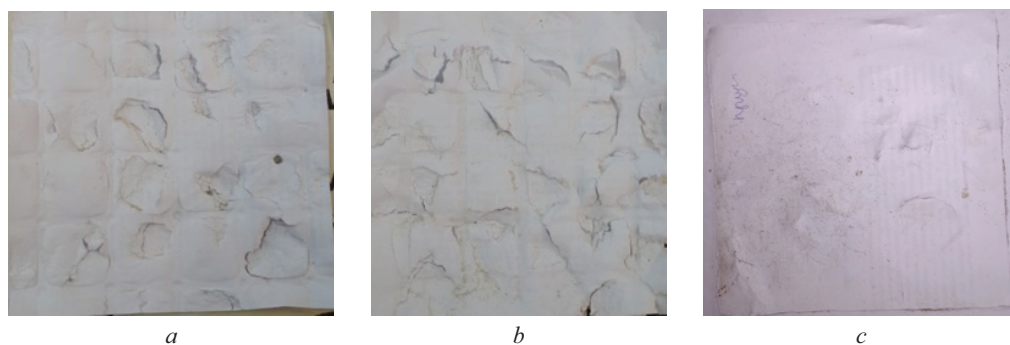


Рис. 12. Результаты заклинки щебня на уплотненном песчаном основании с коэффициентом уплотнения 0,93–0,95: а — георешетка Славрос СД-40; б — георешетка Армосет Б; с — инновационная 3D-георешетка

В ходе извлечения каменного материала из армирующей георешетки пришлось выбивать его из конструкции с привлечением молотка. Этот факт показал, что надежная заклинка возможна на подобных конструкциях, и данное конструктивное решение имеет значительные перспективы для дальнейшего развития в строительных конструкциях.

Аналогичные результаты получены и при двух последующих испытаниях на уплотненном слое песка. Аналогично у георешеток Славрос СД-40 и Армосет Б функция разделения была нарушена и заклинка не происходила в должном виде, наблюдалось проникновение щебня вглубь песчаного основания через представленные георешетки. Инновационная 3D-георешетка, напротив, улучшила свои показатели в части заклинивания каменного материала и выполнения функции разделения, что хорошо видно на рис. 12, с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводя общие выводы проведенных исследований, можно говорить о следующих достигнутых результатах.

Сравнительные испытания на повреждаемость георешеток Славрос СД-40, Армосет Б и инновационной 3D-георешетки показали, что гибкая георешетка Армосет Б подвержена значительно большим продольным и поперечным деформациям в ходе приложения статической нагрузки на уложенный слой каменного материала толщиной 60–70 мм. При этом у жесткой георешетки Славрос СД-40 отсутствовали продольные деформации, но наблюдались более серьезные разрушения отдельных стренг и узловых соединений. Инновационная

3D-георешетка практически не получила повреждений, лишь на отдельных гранях были заметны незначительные углубления на поверхностном слое.

Испытания на оценку функции разделения слоев продемонстрировали, что у плоской гибкой георешетки Армосет Б и жесткой плоской георешетки Славрос СД-40 функция разделения работает неэффективно. Выбранный в качестве индикатора оценки разделения слоев лист белой бумаги получил значительные деформации, и каменный материал проник вглубь песчаного слоя. При этом результаты испытаний для инновационной 3D-георешетки напротив показали отличные результаты по предотвращению проникновения каменного материала вглубь песчаного слоя несмотря на то, что размер отверстия георешетки превышал в 3 раза размер минимальной фракции щебня.

Испытания на оценку заклинивающей способности показали аналогичный характер. Для плоской гибкой георешетки Армосет Б и плоской жесткой георешетки Славрос СД-40 заклинивающая способность оказалась в целом невысокой, каменный материал после проведенного испытания достаточно легко извлекался без сопротивления. Инновационная георешетка, напротив, продемонстрировала результат, при котором для извлечения щебня потребовалось его выбивать с привлечением молотка.

Экспериментальные исследования с разработанной конструкцией инновационной 3D-георешетки показали, что данная георешетка имеет перспективы для применения ее в качестве армирующей прослойки в гражданском строительстве. Необходимо проведение более масштабных экспериментальных исследований для оценки ее эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tamrakar P., Kwon J., Wayne M., Lee H. Calibration of pavement ME rutting model for geogrid stabilized roadways // *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 31. P. 100684. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100684
2. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer geogrids : a review of material, design and structure relationships // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 16. P. 4745. DOI: 10.3390/ma14164745
3. Сиротюк В.В., Левашиов Г.М. Технологическая повреждаемость некоторых геосинтетических материалов, применяемых для армирования асфальтобетонных покрытий // *Дороги и мосты*. 2010. № 1 (23). С. 85–96. EDN OOHCHZ.
4. Carlos D., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M. Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 13. P. 3544. DOI: 10.3390/ma14133544
5. Куликова К.А., Игнатъев А.А. Оценка повреждаемости плоских и пространственных георешеток при армировании материалов конструктивных слоев дорожной одежды // *Дороги и мосты*. 2023. № 1 (49). С. 33–53. EDN JIHUSM.
6. Canestrari F., Belogi L., Ferrotti G., Graziani A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution // *Materials and Structures*. 2015. Vol. 48. Issue 4. Pp. 959–975. DOI: 10.1617/s11527-013-0207-1
7. Viciña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P., Goday-Paucar B., Inga-Lafebre J., Chávez J. et al. Evaluation of the effectiveness of geogrids manufactured from recycled plastics for slope stabilization — a case study // *Polymers*. 2024. Vol. 16. Issue 8. P. 1151. DOI: 10.3390/polym16081151
8. Dong Y. Li, Guo H.J., Han J., Zhang J. Numerical analysis of installation damage of a geogrid with rectangular apertures // *Results in Physics*. 2018. Vol. 9. Pp. 1185–1191. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.04.016
9. Albuja-Sánchez J., Córdor L., Oñate K., Ruiz S., Lal D. Influence of geogrid arrangement on the bearing capacity of a granular soil on physical models and its comparison to theoretical equations // *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5. Issue 9. DOI: 10.1007/s42452-023-05474-w
10. Yuan H., Bai X., Zhao H., Wang J. Experimental study on the Influence of aging on mechanical properties of geogrids and bearing capacity of reinforced sand cushion // *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/8839919.
11. Игнатъев А.А., Курочкина К.А. Оценка прочностных характеристик материалов геосеток, используемых в составе асфальтобетонного дорожного покрытия // *Транспортное строительство*. 2017. № 4. С. 5–7. EDN ZHJYHR.
12. Meng Y., Xu C. Effects of freeze-thaw cycles on the tensile properties of geogrids and shear behavior of geogrid-soil interface // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1335. Issue 1. P. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1335/1/012003
13. Fleury M., Kamakura G., Pitombo C., Cunha A., Ferreira F., Lins da Silva J. Assessing and predicting geogrid reduction factors after damage induced by dropping recycled aggregates // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 13. P. 9942. DOI: 10.3390/su15139942
14. Wang H., Kang M., Kim Y., Qamhia I., Tutumluer E., Shoup H. Evaluating different geogrid products for modulus improvement with bender element sensor technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1332. Issue 1. P. 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/1332/1/012008
15. Alwiyah S. Pengujian daya dukung tanah pasir dengan kekuatan Geogrid // *Journal Saintis*. 2021. Vol. 21. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.25299/saintis.2021.vol21(01).6566
16. Al-Sumaiday H., Khalaf W., Muhawwiss F. Experimental investigation of bearing capacity of circular and ring footings on geogrid-reinforced cohesionless soils // *Civil and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 1. Pp. 349–363. 2024. DOI: 10.2478/cee-2024-0027
17. Wu J., Zhang F., Gao L., Hou J. Bearing capacity and reinforced mechanisms of horizontal-vertical geogrid in foundations: PFC3D Study // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1533. DOI: 10.3390/buildings-14061533
18. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. 5th ed. 2005. 818 p.
19. Патент RU № 2652411 C1, МПК E01C 5/20. Георешетка для армирования дорожной одежды / А.А. Игнатъев, К.А. Курочкина, Е.А. Ронжин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»; заявл. № 2017124781 от 11.07.2017. Оpubл. 26.04.2018. EDN RVYLRA.
20. Куликова К.А., Игнатъев А.А. Оценка влияния поперечного сечения ребра 3D-георешетки на заклинку каменного материала // *Вестник гражданских инженеров*. 2024. № 3 (104). С. 88–94. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94. EDN LOYAOQ.

Поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 29 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Александрович Игнатьев** — доктор технических наук, доцент, директор департамента развития отраслевого образования; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 652263, Scopus: 57223088598, ResearcherID: AAZ-2908-2021, ORCID: 0000-0003-1425-5330; ignatievaa@rosdormii.ru;

Илья Александрович Чижиков — кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9007-2019, РИНЦ ID: 979182, ORCID: 0009-0000-2212-3501; ilya2@mail.ru.

Вклад авторов:

Игнатьев А.А. — научное руководство, концепция исследования, постановка задачи экспериментального исследования, подготовка основного содержания статьи, итоговые выводы.

Чижиков И.А. — подготовка обзора исследований, оформление работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In modern conditions of construction such geosynthetic materials as geogrids are widely used. They are actively used to reinforce soil bases for various foundations, to increase the bearing capacity of weak soils, to separate layers. In road construction, geogrids are actively used to increase the bearing capacity of roadway bases and rutting resistance of roadways [1], as well as to reduce the thickness of structural layers. In addition, reinforcement of soil bases is aimed at increasing the durability of structures.

Today on the market of geosynthetic materials there is a great variety of geogrids designs. Basically, their difference lies in the shape and size of the cell, technology and production methods (woven or welded), in the materials used. The basic shape of cells is square and triangular, the sizes vary from 20 to 50 mm. There are other unique solutions. At the same time, geogrids used for reinforcing asphalt concrete layers, made of basalt or glass fibre, are widely used for road construction. They are placed between asphalt concrete layers at temperatures above 120 °C, which ensures their stability during paving and subsequent operation.

It is worth noting that geogrids are mostly produced flat by manufacturers, dictated by the need to reduce the thickness of the layer and reduce material intensity. This has its own disadvantages. In particular, due to the small thickness the depth of immersion in layers is reduced and adhesion between layers is somewhat reduced, as well as the reinforcing capacity is reduced. Shear between the layers is possible, where damage to the geogrid leads to a significant reduction in its strength [2], thus violating the required monolithicity and, as a consequence, the rapid destruction of the pavement. Speaking about the separating function of geogrids, when they are used to separate layers (e.g. “sand – crushed stone”), it is expected that the stone material can be wedged and its properties stabilized during subsequent operation and that the possible mutual penetration of layers into each other is minimized. It is important that the stone material does not penetrate into the sand

layers and that the design thicknesses of the layers are maintained and that the porosity of the stone material is not compensated by the sandy soil penetrating into the pores. This can only be achieved if the geogrid provides sufficient wedging capacity of the stone material, whereby the crushed stone does not seep through the cells and ensures a reliable retention of the stone material in the lower layers. This is where the main disadvantages of flat geogrids become apparent. The flat surface does not allow for reliable retention of chipped stone (crushed stone), which contributes to its dislodging from the surface. It also requires the mesh size to match the size of the stone material to ensure wedging. There are recommendations that the mesh size should not exceed two sizes of the largest fraction of crushed stone.

Recently, in domestic and foreign practice, the damageability of geogrids placed between layers of stone material or layers of sand and stone material has been actively discussed. The results in some cases are disappointing [3–5]. Moreover, the damageability directly depends on the material from which the geogrid is made [6]. Geogrids produced by extrusion method are more resistant to impact loads and abrasion, but due to the desire of manufacturers to save material during production, the thickness of ribs is greatly reduced, which leads to their higher damageability, as evidenced by studies aimed at numerical modelling of geogrid rib failure [7–9]. At times [3], the wear can reach 90 % of the original strength, which practically nullifies all the obligations imposed on the geogrid to strengthen and reinforce the layers. No less relevant aspect is the resistance to the impact of natural factors. In a number of works this is given special attention. Thus, the impact of ultraviolet and temperature [10–12] can reduce its strength by more than 50 % even before laying the geogrid. Undoubtedly, and the culture of workmanship has a significant impact on the subsequent performance of the object. When laying geogrids any distortions, deliberate change of geometry lead to the fact that the geogrid changes its characteristics and is more actively exposed to damage

and reduction of operational parameters [2]. In addition, on the geogrid laid on the prepared surface, crushed stone is unloaded from a dump truck, which at a height of more than 1 m causes significant damage and even destruction. A study [13] is devoted to the study of this effect, in which the damage of geogrids during the fall of stone material from a height of 1 and 2 m was considered. The results of the study showed that the homogeneity of the size of stone material has the greatest influence on the damageability of geogrids. And in the practice of construction it is the homogeneity of stone material that has found the widest application. Mixtures of stone materials are used much less frequently. All this creates certain difficulties for the production of works. It is also important that crushed stone has a jagged surface, which quite easily cuts or chops the individual ribs of the geogrid.

Despite the large number of works devoted to the study of the peculiarities of reinforcement of structural layers and foundations [14–18] and assessment of damageability of geogrids located between layers of stone material or layers of sand and crushed stone, there are practically no studies aimed at assessing the wedging capacity. And this factor is one of the most important from the point of view of increasing the bearing capacity and reducing the thickness of the structural layer, as well as reducing the effect of mutual penetration of layers into each other.

For a number of years, a team of authors has been conducting research on studying the peculiarities of reinforcing foundations with innovative 3D geogrid [19, 20]. The results are unique both in terms of reinforcing capacity and wedging ability of the stone material. Research continues in this direction. Within the framework of this publication, the results of experimental studies aimed at comparing geogrids in terms of damage and wedging capacity when placed between sand and stone material layers will be presented.

A new method of assessing the jamming ability of rock material is proposed, which involves laying

a sheet of paper as an indicator. The uniqueness of this method is that it allows to clearly see the difference when comparing several geogrids for wedging capacity and how effectively the geogrid keeps the stone material from penetrating into the sand layers.

MATERIALS AND METHODS

The consolidation capacity, separation function and fracture resistance of prefabricated geogrid specimens, including the innovative 3D geogrid, were evaluated under laboratory conditions.

The aim of the experiment was to evaluate geogrids of different design and material during the compaction process at the sand – crushed stone interface and then compare their mechanical resistance to failure under repeated static load and wedging capacity.

The following geogrid specimens were selected for the experiment:

1. Extruded geogrid Slavros SD-40 with 40×40 mm cell (Fig. 1).

Table 1 presents physical and mechanical properties of SD-40 geogrid.

2. Woven geogrid Armoset B with 30×30 mm mesh (Fig. 2).

Table 2 shows physical and mechanical properties of Armoset B geogrid.

3. Innovative 3D geogrid for pavement reinforcement with a diagonal dimension of 70 mm (Fig. 3).

Geogrid characteristics: material — Petg; hole diameter — 63 mm; rib height — 8 mm; rib width — 10 mm.

Geogrid for pavement reinforcement is a configuration of triangular cells formed by intersection of edges. The configuration of cells forms a regular hexagon.

The essence of the test was to simulate the technology of geogrid laying and mechanical damage due to its contact with stone material during compaction.

For the tests we used a hydraulic unit ZIM P-10, which consisted of a load plate, a test container and a power unit creating the required pressure (Fig. 4).

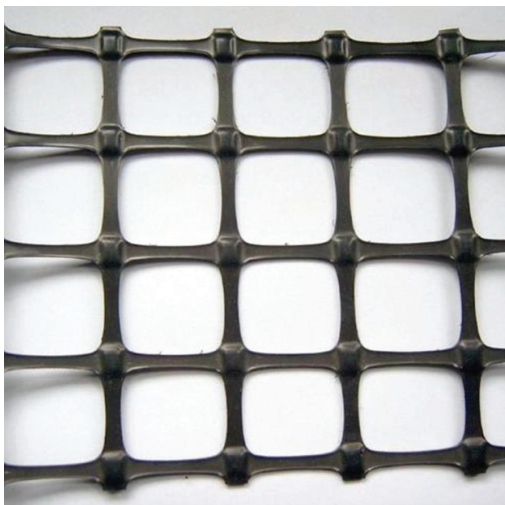


Fig. 1. Extruded geogrid Slavros SD-40

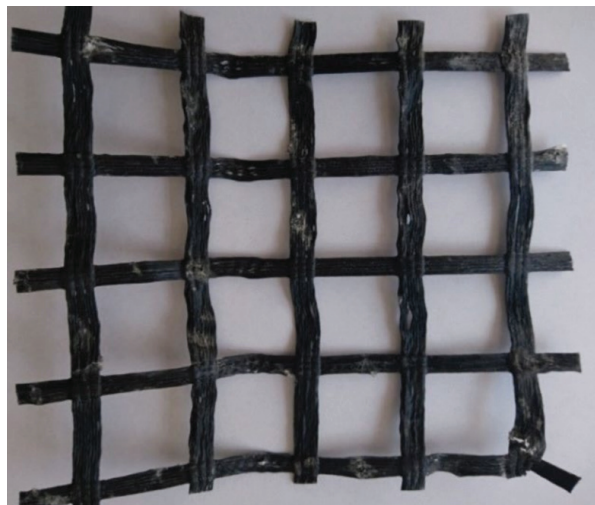


Fig. 2. Woven geogrid Armoset B

Table 1. Physical and mechanical properties of Slavros SD-40 geogrids

Indicator	Value
Tensile load, kN/m, not less: <ul style="list-style-type: none">• at standardized load along/across;	40/40
at relative elongation: <ul style="list-style-type: none">• 2 % along/across;• 5 % along/across	13/13 26/26
Cell size, length/width, mm	40/40
Cell skew, degrees	±3
Roll width, m, no more than	4
Roll length ±1 %, m	50

Table 2. Technical characteristics of Armoset B

Indicator	Value
Tensile load, kN/m, not less: <ul style="list-style-type: none">• at standardized load along/across;	50/50
at relative elongation: <ul style="list-style-type: none">• 3 % along/across	12.5/12.5
Cell size, length/width, mm	42 ± 2/42 ± 2
Cell skew, degrees	Not standardized
Roll width, m, no more than	5.2 ± 0.1
Roll length ±1 %, m	100



Fig. 3. Innovative 3D geogrid for pavement reinforcement



Fig. 4. Hydraulic installation of ZIM P-10

Experiment

A test container, which is a metal box with dimensions 20 × 20 × 20 × 20 cm and a metal lid with dimensions 19.5 × 19.5 × 19.5 × 10.5 cm (Fig. 5) with a wall thickness of 5 mm, was fabricated for testing.

In order to study the peculiarities of reinforcement, to assess the jamming ability, as well as to evaluate the function of layer separation, three types of tests were performed:

- 1) at the boundary of layers “loose sand (not compacted — natural filling) – paper – crushed stone”;
- 2) at the boundary of layers “compacted sand (compaction factor 0.93–0.95) – paper – crushed stone”;

3) at the boundary of layers “compacted sand (compaction factor 0.98) – paper – crushed stone”.

For each type of tests three specimens of investigated geogrids were selected.

At the bottom of the test container (Fig. 6) a layer of granular material (medium coarse sand) with a thickness of 30 to 40 mm was placed. In the first test, the sand layer was not compacted. In the second test, the sand was compacted with a load plate to a compaction factor of 0.93–0.95. In the third test, in addition to the impact of the load plate, an optimum moisture content of 8–9 % and a compaction factor of 0.98 were ensured for compaction.

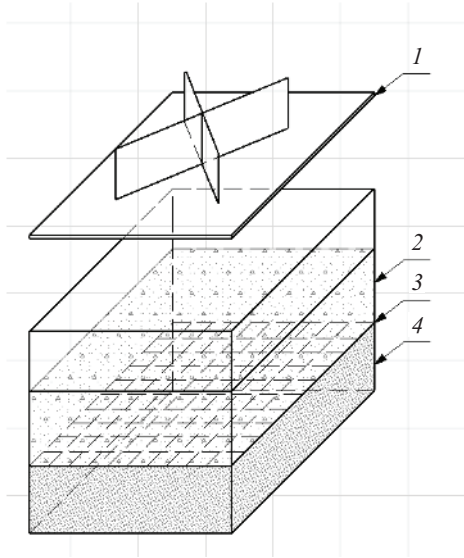


Fig. 5. Test container (metal box): 1 — metal lid; 2 — base layer (granite crushed stone M1000 fraction 20–40 mm); 3 — separating layer of geogrid and white paper sheet as an indicator to assess the jamming ability of the stone material; 4 — additional base layer — medium coarse sand

A sheet of white paper was then placed on the prepared base to determine the percentage of crushed stone jamming and the effectiveness of the jamming during the tests. Thus, it acted as an indicator.

The geogrid was placed on the prepared base in the centre of the container and filled with a layer of crushed stone M1000 of 20–40 mm fraction with thickness from 60 to 70 mm (Fig. 7).

During one test, a load of 80 kN was applied through the load plate three times and held for 30 s.

The specimen was then removed and the damage was visually assessed and recorded.

RESEARCH RESULTS

Test results at the interface of loose sand – paper – crushed stone layers.

1. Armoset B geogrid.

At the bottom of the test container a layer of loose sand 30 to 40 mm thick was placed. Then a layer of paper, geogrid Armoset B was laid and crushed stone M1000 of 20–40 mm fraction with thickness of 60–70 mm was poured on top.

Fig. 8 shows the test results.



Fig. 6. Prepared base of medium coarse sand

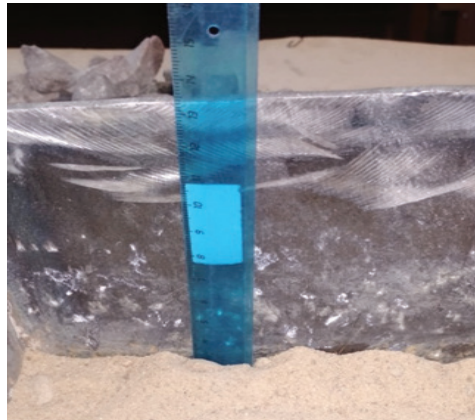


Fig. 7. Placed crushed stone layer on sand layer, paper layer and geogrid under test

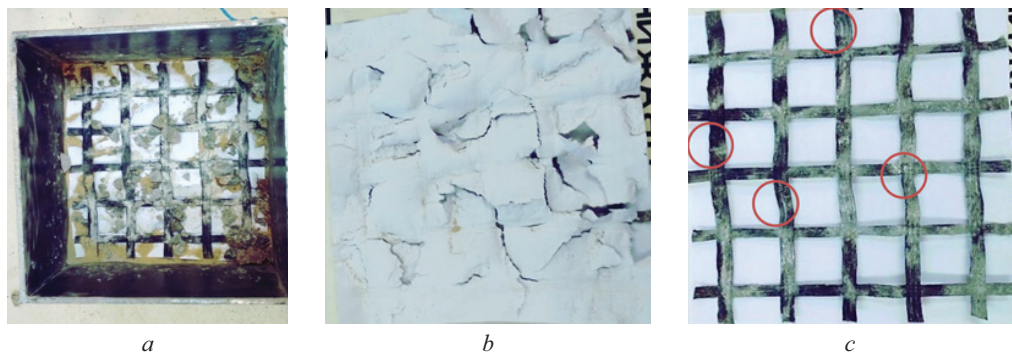


Fig. 8. Results of experimental studies of Armoset B: *a* — general condition of reinforced geogrid on loose sand layer; *b* — condition of wedging indicator (paper); *c* — damage of removed Armoset B geogrid

The results of the first test show that the Armoset B geogrid specimen has received numerous damages in the form of dents and kinks of individual strands. There is no failure of the nodal joint, only deformations.

Based on the total amount of damage and the nature of the damage to the laid paper layer, the jamming of the stone material is minimal, there are characteristic tears in the sheet and there is noticeable penetration of the stone material through the reinforced geogrid. This may indicate that the Armoset B geogrid is not adequately performing its pavement separation function.

The number of damages is generally small (up to 10 characteristic visual damages were observed). It can be noted that the fraction of 20–40 mm of mineral aggregate has a significant impact on the damageability of geogrid. The smaller the fraction of mineral aggregate and the more carefully selected granulometric composition, the less damage to the geogrid. Evaluating the jam-

ming ability of the geogrid, we note that after compaction the stone material was easily extracted without effort, which indicates a low jamming ability of this geogrid.

2. Slavros SD.

At the bottom of the test container was laid loose sand with thickness from 30 to 40 mm, followed by a layer of white paper, Slavros SD geogrid and crushed stone M1000 fraction 20–40 mm with thickness of 60–70 mm.

Fig. 9 shows the test results of Slavros SD-40 geogrid.

According to the results of the first test it can be seen that the specimen of Slavros SD-40 geogrid received numerous damages in the form of destruction of individual strands and nodal joints. Based on the number of damages on the paper layer, the percentage of rock material jamming by the geogrid is low and insufficient. The nature of the tears on the paper

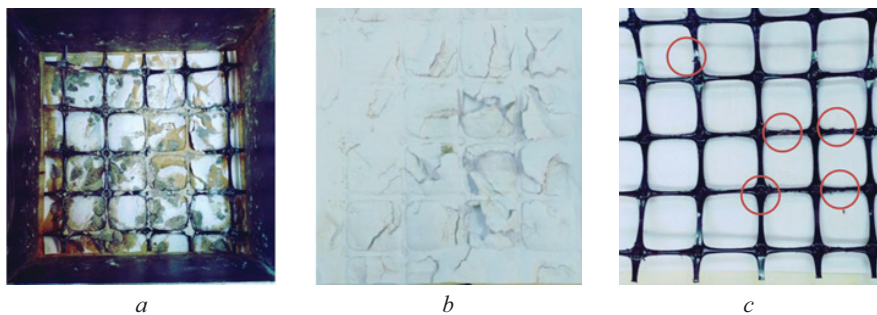


Fig. 9. Experimental results of Slavros SD-40

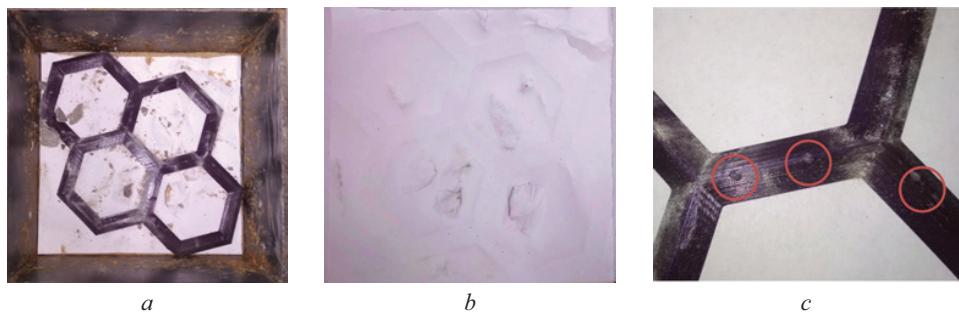


Fig. 10. Experimental results of innovative 3D geogrid



Fig. 11. Jamming of stone material in the innovative 3D geogrid

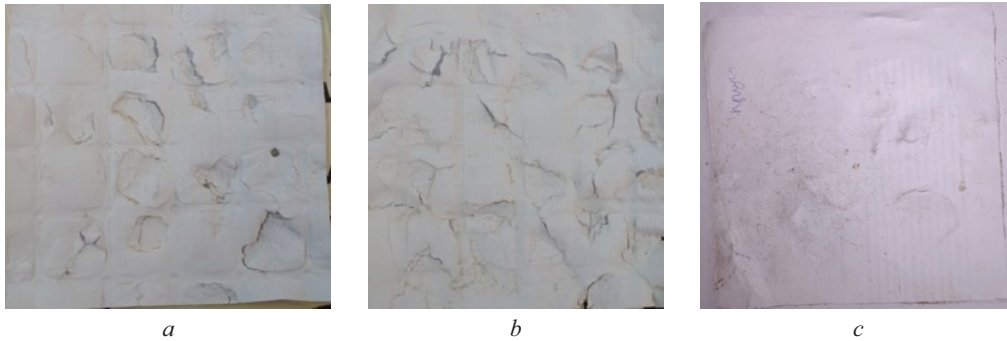


Fig. 12. Results of crushed stone wedging on compacted sandy base with compaction factor 0.93–0.95: *a* — Slavros SD-40 geogrid; *b* — Armoset B geogrid; *c* — innovative 3D geogrid

shows that Slavros SD geogrid does not sufficiently cope with the function of separating the pavement layers. There is a significant penetration of stone material into the sand layer, while the mesh size is 40 mm, and the smallest fraction of stone material is 20 mm and the largest fraction is 40 mm.

The Slavros SD geogrid has crush damage in the form of crushed edges, which is concentrated near the nodal joints. No splitting of the nodal joints is noted. The ribs have sustained significant damage that has definitely affected their strength. When assessing the jamming ability of the geogrid, it is worth noting that after compaction, the stone material was easily removed without effort, which indicates that the jamming ability of this geogrid is not high.

3. Innovative 3D geogrid.

At the bottom of the test container was laid a layer of loose sand with a thickness of 30 to 40 mm, followed by a layer of white paper, innovative 3D geogrid and crushed stone M1000 fraction 20–40 mm with a thickness of 60–70 mm.

Fig. 10 shows the results of the tests.

Based on the amount of damage on the paper layer, we can speak about a sufficient and high percentage of jamming of the rock material. This shows that the 3D geogrid has perfectly fulfilled the function of separating the loose sand and crushed stone layers. The wedging of the stone material occurs above the reinforcement layer, which is very important for reinforcing layers and increasing the efficiency of the reinforcement layers. With this effect we can safely say that it is possible to reduce the thickness of the stone material layer due to the high wedging ability of the geogrid.

The innovative 3D geogrid shows minimal damage in the form of small depressions. There are no kinks or deformation of the geogrid structure. There was no splitting of the node connections. In general, the damage is characterized as insignificant and does not affect the strength of the geosynthetic material. Also, in the process of extraction of the base layer of granite crushed stone there was a reliable jamming of the crushed stone in the cells, which have sizes more than 3 times exceeding the minimum fraction of crushed stone (60 mm) (Fig. 11). During the removal of the stone material from the reinforcing geogrid, it was necessary to knock it out of the structure using a hammer. This fact showed that reliable wedging is possible on such structures, and this design solution has significant prospects for further development in building structures.

Similar results were obtained in two subsequent tests on a compacted sand layer. Similarly, for Slavros SD-40 and Armoset B geogrids, the separation function was impaired and the wedging did not take place in a proper manner, there was a penetration of crushed stone deep into the sand base through the presented geogrids. In contrast, the innovative 3D geogrid improved its performance in terms of wedging of stone material and separation function, which can be clearly seen in Fig. 12, *c*.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Summarising the general conclusions of the conducted research, the following achieved results can be stated.

Comparative damage tests of Slavros SD-40, Armoset B and innovative 3D geogrid have shown that flexible geogrid Armoset B is subjected to significantly

higher longitudinal and transverse deformations during the application of static load on the laid layer of stone material 60–70 mm thick. At the same time, the rigid Slavros SD-40 geogrid had no longitudinal deformations, but more serious failures of individual strands and nodal joints were observed. The innovative 3D geogrid was practically undamaged, with only minor depressions in the surface layer on some faces.

Layer separation function evaluation tests showed that the Armoset B flat flexible geogrid and the Slavros SD-40 rigid flat geogrid did not have an effective separation function. The white paper sheet chosen as an indicator to evaluate the separation of the layers was significantly deformed and the stone material penetrated deep into the sand layer. In contrast, the test results for the innovative 3D geogrid showed excellent results in

preventing the stone material from penetrating the sand layer, despite the fact that the geogrid opening size was 3 times the minimum crushed stone fraction.

The jamming capacity evaluation tests showed a similar pattern. For the flat flexible geogrid Armoset B and flat rigid geogrid Slavros SD-40 the jamming ability was generally low, the stone material was easily extracted without resistance after the test. The innovative geogrid, on the contrary, showed the result that in order to extract the crushed stone it was necessary to knock it out with a hammer.

Experimental studies with the developed design of the innovative 3D geogrid showed that this geogrid has prospects for its application as a reinforcing layer in civil engineering. It is necessary to conduct larger-scale experimental studies to evaluate its effectiveness.

REFERENCES

1. Tamrakar P., Kwon J., Wayne M., Lee H. Calibration of pavement ME rutting model for geogrid stabilized roadways. *Transportation Geotechnics*. 2021; 31:100684. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100684
2. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer geogrids: a review of material, design and structure relationships. *Materials*. 2021; 14(16):4745. DOI: 10.3390/ma14164745
3. Sirotuk V.V., Levashov G.M. Technological process damageability of certain geosynthetic materials applied for reinforcing asphalt concrete pavements. *Roads and Bridges*. 2010; 1(23):85-96. EDN OOHCHZ. (rus.).
4. Carlos D., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M. Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion. *Materials*. 2021; 14(13):3544. DOI: 10.3390/ma14133544
5. Kulikova K.A., Ignatiev A.A. Estimation of damageability of flat and spatial geogrids when reinforcing materials of road pavement structural layers. *Roads and Bridges*. 2023; 1(49):33-53. EDN JIHUSM. (rus.).
6. Canestrari F., Belogi L., Ferrotti G., Graziani A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution. *Materials and Structures*. 2015; 48(4):959-975. DOI: 10.1617/s11527-013-0207-1
7. Vicuña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P., Godoy-Paucar B., Inga-Lafebre J., Chávez J. et al. Evaluation of the effectiveness of geogrids manufactured from recycled plastics for slope stabilization — a case study. *Polymers*. 2024; 16(8):1151. DOI: 10.3390/polym16081151
8. Dong Y. Li, Guo H.J., Han J., Zhang J. Numerical analysis of installation damage of a geogrid with rectangular apertures. *Results in Physics*. 2018; 9:1185-1191. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.04.016
9. Albuja-Sánchez J., Córdor L., Oñate K., Ruiz S., Lal D. Influence of geogrid arrangement on the bearing capacity of a granular soil on physical models and its comparison to theoretical equations. *SN Applied Sciences*. 2023; 5(9). DOI: 10.1007/s42452-023-05474-w
10. Yuan H., Bai X., Zhao H., Wang J. Experimental study on the Influence of aging on mechanical properties of geogrids and bearing capacity of reinforced sand cushion. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020. DOI: 10.1155/2020/8839919
11. Ignatiev A.A., Kurochkina K.A. The evaluation of strength properties of materials for geomeshes used as a component of bituminous concrete pavement. *Transport Construction*. 2017; 4:5-7. EDN ZHJYHR. (rus.).
12. Meng Y., Xu C. Effects of freeze-thaw cycles on the tensile properties of geogrids and shear behavior of geogrid-soil interface. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024; 1335(1):012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1335/1/012003
13. Fleury M., Kamakura G., Pitombo C., Cunha A., Ferreira F., Lins da Silva J. Assessing and predicting geogrid reduction factors after damage induced by dropping recycled aggregates. *Sustainability*. 2023; 15(13):9942. DOI: 10.3390/su15139942
14. Wang H., Kang M., Kim Y., Qamhia I., Tutumluer E., Shoup H. Evaluating different geogrid products for modulus improvement with bender element sensor technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024; 1332(1):012008. DOI: 10.1088/1755-1315/1332/1/012008
15. Alwiyah S. Pengujian daya dukung tanah pasir dengan perkuatan Geogrid. *Journal Saintis*. 2021; 21(1):1-10. DOI: 10.25299/saintis.2021.vol21(01).6566
16. Al-Sumaiday H., Khalaf W., Muhawiss F. Experimental investigation of bearing capacity of circular and ring footings on geogrid-reinforced cohesionless

soils. *Civil and Environmental Engineering*. 2024; 20(1):349-363. DOI: 10.2478/cee-2024-0027

17. Wu J., Zhang F., Gao L., Hou J. Bearing capacity and reinforced mechanisms of horizontal–vertical geogrid in foundations: PFC3D Study. *Buildings*. 2024; 14(6):1533. DOI: 10.3390/buildings14061533

18. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. 5th edition. 2005; 818.

19. Patent RU No. 2652411 C1, МПК E01C 5/20. *Geogrid for pavement reinforcement* / A.A. Ignatiev,

K.A. Kurochkina, E.A. Ronzhin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Technical University”; application No. 2017124781 dated 11.07.2017. Published 26.04.2018. EDN RVYLRA. (rus.).

20. Kulikova K.A., Ignatyev A.A. Evaluation of the influence of the 3D geogrid rib cross-section on the wedging of stone material. *Bulletin of Civil Engineers*. 2024; 3(104):88-94. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94. EDN LOYAOQ. (rus.).

Received September 9, 2024.

Adopted in revised form on September 26, 2024.

Approved for publication on September 29, 2024.

B I O N O T E S: **Aleksey A. Ignatyev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Industry Education Development; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 652263, Scopus: 57223088598, ResearcherID: AAZ-2908-2021, ORCID: 0000-0003-1425-5330; ignatievaa@rosdornii.ru;

Il'ya A. Chizhikov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9007-2019, ID RSCI: 979182, ORCID: 0009-0000-2212-3501; ilya2@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksey A. Ignatyev — scientific guidance, research concept, setting the task of the experimental study, preparation of the main content of the article, final conclusions.

Il'ya A. Chizhikov — preparation of research review, design of the paper.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Генеративный дизайн в BIM для автоматизации
архитектурных решений на основе требований клиентов

Эрик Артурович Григорян, Ангелина Олеговна Рыбакова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИИВ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Цифровая трансформация проектно-строительной отрасли привела к активному развитию технологий автоматизированного проектирования, среди которых особое место занимает генеративный дизайн, интегрированный с BIM-моделированием. Исследование направлено на анализ текущего состояния и перспектив применения генеративного дизайна для автоматизации архитектурных решений с учетом разнородных требований заказчиков. Актуальность работы обусловлена необходимостью сокращения времени проектирования при одновременном повышении качества и индивидуализации проектных решений.

Материалы и методы. Исследование основано на системном анализе научных публикаций за 2017–2023 гг., посвященных генеративному дизайну и BIM-технологиям. Проведено сравнительное изучение существующих программных решений (Autodesk Revit с Dynamo, Grasshopper для Rhino, IDEA StatiCa, Generative Components). Применены методы экспертных оценок для определения эффективности внедрения генеративных алгоритмов, а также метод кейс-стади для анализа реализованных проектов.

Результаты. Выявлены четыре доминирующих подхода к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы: параметрическое моделирование на основе графов, эволюционная оптимизация, машинное обучение и агентное моделирование. Установлено, что алгоритмы генеративного дизайна позволяют сократить время проектирования на 35–40 % при одновременном рассмотрении в 5–7 раз большего количества проектных вариантов. Разработана методология внедрения генеративных алгоритмов, охватывающая полный цикл от формализации требований заказчика до оценки результатов. Определены ключевые препятствия для широкого внедрения: недостаточная стандартизация технологий, сложность формализации субъективных эстетических критериев и значительные вычислительные требования для комплексных проектов.

Выводы. Генеративный дизайн в сочетании с BIM-технологиями представляет собой эффективный инструмент автоматизации архитектурного проектирования, позволяющий находить оптимальные решения сложных многокритериальных задач. Предложенная методология дает возможность систематизировать процесс внедрения генеративных алгоритмов в существующие BIM-процессы. Дальнейшее развитие технологии требует создания специализированных библиотек типовых генеративных компонентов и методов интерпретации нечетких требований заказчиков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии информационного моделирования, генеративный дизайн, параметрическое проектирование, автоматизация проектирования, архитектурные решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Григорян Э.А., Рыбакова А.О. Генеративный дизайн в BIM для автоматизации архитектурных решений на основе требований клиентов // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.10

Автор, ответственный за переписку: Эрик Артурович Григорян, grigorianea@mgsu.ru.

Generative design in BIM for the automation of architectural
solutions based on customer requirements

Erik A. Grigoryan, Angelina O. Rybakova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The digital transformation of the architectural and construction industry has led to the active development of computer-aided design technologies, with generative design integrated into BIM modelling playing a special role. This research aims to analyze the current state and prospects of generative design application for architectural solutions automation considering diverse client requirements. The relevance of this work is due to the need to reduce design time while simultaneously improving quality and individuality of design solutions.

Materials and methods. The study is based on a systematic analysis of scientific publications from 2017–2023 on generative design and BIM technologies. A comparative study of existing software solutions (Autodesk Revit with Dynamo, Grasshopper for Rhino, IDEA StatiCa, Generative Components) was conducted. Expert evaluation methods were applied to determine the effectiveness of implementing generative algorithms, and the case study method was used to analyze implemented projects.

Results. Four dominant approaches to integrating generative design into BIM processes were identified: graph-based parametric modelling, evolutionary optimization, machine learning, and agent-based modelling. It was established that generative design algorithms can reduce design time by 35–40 % while simultaneously considering 5–7 times more design variants. A methodology for implementing generative algorithms was developed, covering the full cycle from formalizing client requirements to evaluating results. Key obstacles to widespread implementation were identified: insufficient standardization of technologies, complexity in formalizing subjective aesthetic criteria, and significant computational requirements for complex projects.

Conclusions. Generative design combined with BIM technologies is an effective tool for automating architectural design, allowing optimal solutions for complex multi-criteria problems. The proposed methodology systematizes the process of implementing generative algorithms into existing BIM workflows. Further technology development requires creating specialized libraries of typical generative components and methods for interpreting fuzzy client requirements.

KEYWORDS: BIM technologies, generative design, parametric modelling, design automation, architectural solutions

FOR CITATION: Grigoryan E.A., Rybakova A.O. Generative design in BIM for the automation of architectural solutions based on customer requirements. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.10

Corresponding author: Erik A. Grigoryan, grigorianea@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурное проектирование — это многогранный процесс, в котором традиционно сочетались творческий аспект и техническая точность. Однако нарастающая сложность современных проектов, увеличение объемов информации и сокращение сроков проектирования требуют новых приемов к организации проектного процесса. Переход от классических методов к цифровым инструментам проектирования создал предпосылки для формирования нового подхода — генеративного дизайна в среде информационного моделирования зданий и сооружений.

Генеративный дизайн представляет собой процесс, при котором проектные решения генерируются алгоритмически на основе заданных параметров, ограничений и целевых функций [1]. В отличие от традиционного проектирования, где решения появляются линейно и последовательно, генеративный подход предполагает одновременное формирование множества вариантов с возможностью их дальнейшей оценки и отбора оптимальных. Интеграция таких алгоритмов с технологией информационного моделирования зданий (BIM) открывает новые горизонты в автоматизации архитектурного проектирования.

Первые эксперименты с компьютерной генерацией архитектурных форм относятся к 1960 гг., когда впервые была предложена концепция машинного проектирования. Практическое применение генеративных методов в архитектуре долгое время ограничивалось вычислительными возможностями и отсутствием необходимых программных инструментов. Ситуация кардинально изменилась в начале XXI в. с развитием параметрического моделирования и появлением таких инструментов, как Grasshopper (плагин для Rhinoceros) и Dynamo (плагин для Autodesk Revit), значительно упростивших разработку генеративных алгоритмов [2].

Параллельно с этим развитие BIM-технологий трансформировало процесс проектирования из простого построения геометрических моделей в комплексное управление информацией о здании на протяжении всего его жизненного цикла [3]. Это создало благоприятную среду для внедрения генеративных методов, поскольку BIM-модели уже содержат структурированную информацию обо всех компонентах здания, их взаимосвязях и свойствах.

Сегодня наблюдается интенсивное развитие нового направления — вычислительного проектирования (computational design), объединяющего генеративные методы, параметрическое моделирование и алгоритмические подходы к архитектурным задачам. Но интеграция генеративного дизайна в BIM-процессы сталкивается с рядом вызовов. Так, Тейтин и соавторы отмечают отсутствие единых приемов к формализации проектных требований и ограничений, что затрудняет унификацию генеративных алгоритмов. Янг и Ли [4] указывают на сложность перевода субъективных эстетических критериев, важных для заказчиков, в измеримые параметры генеративных моделей.

Несмотря на эти трудности, интерес к генеративным методам в архитектуре неуклонно растет. В исследовании Мюллера и Дейтла проанализировано 126 архитектурных бюро, из которых 67 % используют элементы генеративного проектирования, а 89 % планируют расширить его применение в ближайшие 3–5 лет. Это свидетельствует о высоком потенциале данного направления и его возрастающей значимости для отрасли.

Существует несколько подходов к реализации генеративного дизайна в контексте BIM. На сегодняшний момент выделяют четыре основные категории: параметрическое моделирование, эволюционные алгоритмы, машинное обучение и агентное моделирование. Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и ограничения, кото-

рые необходимо учитывать при внедрении в практику архитектурного проектирования.

Лу и Чен [5] отмечают, что выбор подхода к генеративному дизайну должен определяться спецификой решаемых задач. Для проектирования фасадных систем наиболее эффективны параметрические модели, учитывающие геометрические и конструктивные ограничения. В свою очередь, при оптимизации внутренних пространств преимущество имеют агентные модели, симулирующие поведение людей в среде.

Касперзюк и соавт. [6] продемонстрировали возможность использования генеративных алгоритмов для оптимизации акустических характеристик помещений. Предложенный ими способ позволяет автоматически генерировать и оценивать варианты формы и отделки поверхностей, обеспечивающие заданные акустические параметры.

Хотя теория генеративного дизайна активно развивается, практическое применение этих методов в архитектурном проектировании сталкивается с рядом барьеров. Специалисты отрасли отмечают, что внедрение генеративных методов требует пересмотра традиционных процессов проектирования и формирования новых компетенций у архитекторов. По мнению авторов, будущее архитектуры лежит на стыке творческого мышления и вычислительных методов.

Нгуен и Тран [7] исследовали роль генеративного дизайна в оптимизации энергоэффективности зданий и пришли к выводу, что интегрированный с BIM подход позволяет на 15–23 % снизить энергопотребление за счет оптимизации геометрии здания, ориентации и характеристик светопрозрачных конструкций. Авторы подчеркивают важность комплексного подхода, учитывающего не только энергетические, но и экономические аспекты проектных решений.

Целью настоящего исследования является разработка методологических основ и практических рекомендаций по интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы для автоматизации создания архитектурных решений на основе разнородных требований заказчиков. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы и технологии генеративного дизайна, применимые в контексте BIM.
2. Разработать методологию формализации требований заказчиков для их интеграции в генеративные алгоритмы.
3. Создать и апробировать на практических примерах комплексную модель оценки и отбора генерируемых проектных решений.
4. Определить перспективные направления дальнейшего развития интегрированных генеративно-информационных технологий.

Научная новизна исследования заключается в системном подходе к интеграции генеративных

методов в BIM-процессы и разработке методологии, учитывающей как технические, так и субъективные (эстетические, эмоциональные) аспекты архитектурного проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования строилась на комплексном анализе существующих подходов и технологий генеративного дизайна, их потенциала и ограничений в контексте BIM-процессов. Была разработана многоэтапная структура исследования, включающая как теоретические, так и практические компоненты.

На первом этапе проведен систематический обзор литературы, охватывающий публикации за период 2013–2023 гг. Для отбора релевантных источников использовались наукометрические базы данных Web of Science и Scopus, а также специализированные ресурсы Cumincad и IAARC. Поисковые запросы включали комбинации ключевых терминов: generative design, computational design, BIM, architectural automation, parametric modeling. В результате первичного отбора идентифицировано 456 публикаций, из которых после оценки релевантности в финальный анализ вошли 183 работы.

Для структурированного анализа собранный массив публикаций классифицирован по нескольким параметрам:

- 1) подход к генеративному дизайну (параметрический, эволюционный, основанный на машинном обучении, агентный) [8–12];
- 2) сфера архитектурного применения (объемно-планировочные решения, фасадные системы, конструктивные элементы и др.) [13, 14];
- 3) степень интеграции с BIM (полная, частичная, обособленная);
- 4) стадия практического внедрения (концептуальная разработка, прототип, коммерческое решение).

На втором этапе осуществлено сравнительное исследование программных платформ и инструментов, поддерживающих генеративный дизайн в контексте BIM [15–19]. Анализ охватывал как специализированные решения (Dynamo для Revit, Grasshopper для Rhino, Generative Components для Bentley Systems), так и универсальные платформы, адаптируемые для архитектурных задач (Project Refinery, Galapagos, Optimo). Оценка инструментов проводилась по следующим критериям:

- функциональные возможности;
- интероперабельность с BIM-системами;
- доступность и простота освоения;
- гибкость и масштабируемость;
- производительность и вычислительная эффективность;
- поддержка и документация.

Третий этап включал разработку методики формализации требований заказчиков для их интеграции в генеративные алгоритмы [20]. Для этого

проанализированы типовые требования из 25 технических заданий на проектирование объектов различного назначения (жилые здания, общественные здания, промышленные объекты). На основе контент-анализа эти требования классифицированы по следующим категориям:

- нормативные (соответствие строительным нормам и правилам);
- функциональные (соответствие целевому назначению объекта);
- экономические (стоимость строительства и эксплуатации);
- экологические (энергоэффективность, экологичность материалов);
- эстетические (визуальные характеристики, стилистика);
- социально-культурные (соответствие социальному контексту).

Для каждой категории разработаны методы квантификации и формализации требований для их интеграции в генеративные алгоритмы. Особое внимание уделялось преобразованию качественных и субъективных критериев (таких как эстетические предпочтения) в измеримые параметры.

Четвертый этап посвящен экспериментальному моделированию и практической апробации разработанных подходов. С этой целью созданы четыре экспериментальные модели, реализующие различные подходы к генеративному дизайну в среде BIM:

- 1) параметрическая модель фасадной системы с адаптивными элементами затенения;
- 2) эволюционная модель оптимизации объемно-планировочных решений многоквартирного жилого здания;
- 3) модель на основе машинного обучения для прогнозирования и оптимизации энергетических характеристик здания;
- 4) агентная модель для оптимизации пешеходных потоков внутри многофункционального комплекса.

Каждая модель разрабатывалась на базе реальных проектных данных, предоставленных архитектурно-проектными бюро, с учетом типовых требований заказчиков. Для оценки эффективности моделей использовались количественные метрики (время проектирования, количество рассмотренных вариантов, соответствие заданным критериям) и экспертные оценки практикующих архитекторов.

С целью верификации разработанных подходов и методик проведено тестирование на трех реальных проектах:

- 1) многофункциональный жилой комплекс (площадь 45 000 м²);
 - 2) общественно-деловой центр (площадь 28 000 м²);
 - 3) центр обработки данных (площадь 18 000 м²).
- Для каждого проекта был разработан комплексный генеративный алгоритм, учитывающий

специфические требования заказчика и особенности объекта. Результаты применения алгоритмов сравнивались с традиционным процессом проектирования по таким параметрам, как время разработки, качество решений, соответствие требованиям и удовлетворенность заказчика.

На заключительном этапе исследования на основе полученных результатов разработана методология интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы, охватывающая весь жизненный цикл проекта от формализации требований до оценки результатов. Методология включает практические рекомендации, алгоритмы действий, шаблоны для формализации требований и критерии оценки генерируемых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ научной литературы и программных решений выявил четыре доминирующих приема к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и ограничениями.

Параметрическое моделирование на основе графов является наиболее распространенным подходом, реализованным в таких инструментах, как Dynamo для Revit и Grasshopper для Rhino. Эти инструменты позволяют создавать сложные алгоритмические конструкции через визуальное программирование, что делает их доступными для архитекторов без глубоких знаний в программировании. Анализ показал, что 76 % исследованных архитектурных бюро используют именно этот метод.

Ключевое преимущество параметрического подхода заключается в высокой степени контроля над генеративным процессом и прозрачности алгоритмов. Однако выявлены и существенные ограничения: сложность масштабирования для решения многофакторных задач и ограниченная способность к самообучению и адаптации.

На основе полученного анализа построен график, демонстрирующий соотношение времени, затрачиваемого на различные этапы разработки параметрической модели, и показывающий, что настройка зависимостей и ограничений занимает наибольшую долю времени (рис. 1).

Эволюционная оптимизация представляет собой второй распространенный подход, основанный на принципах генетических алгоритмов. Такие инструменты, как Galapagos и Octopus для Grasshopper, а также Project Refinery для Dynamo, позволяют находить оптимальные решения путем итеративной эволюции множества вариантов. Этот способ особенно эффективен для решения многокритериальных задач оптимизации, где необходимо находить баланс между противоречивыми требованиями.

Эксперименты авторов показали, что эволюционные алгоритмы дают возможность рассмотреть в 5–7 раз больше проектных вариантов по сравне-

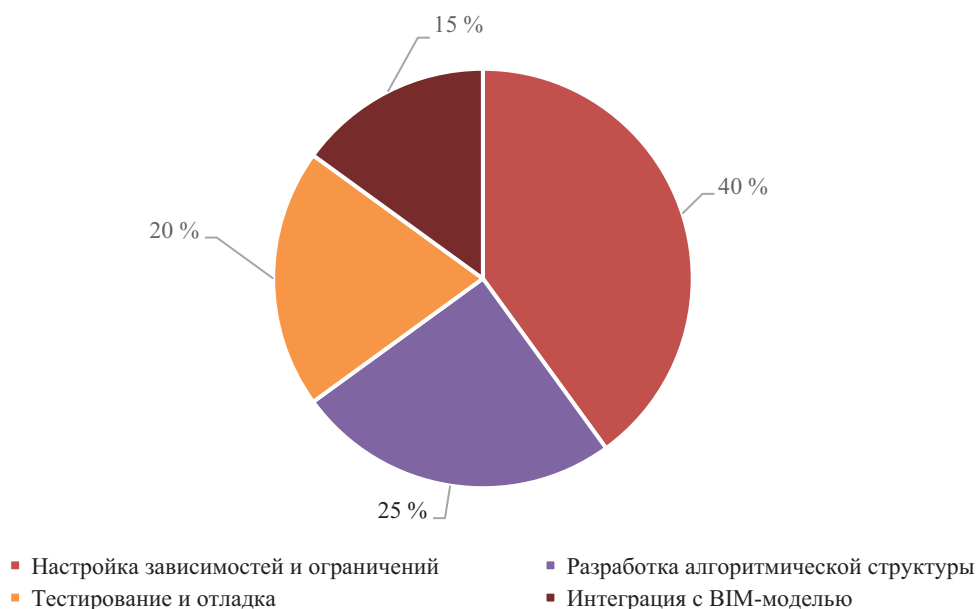


Рис. 1. График распределения времени разработки параметрической модели

нию с ручным перебором, что значительно повышает вероятность нахождения оптимального решения. Однако существенным недостатком является высокая вычислительная сложность и время, необходимое для достижения конвергенции. Для комплексных проектов это может составлять от нескольких часов до нескольких дней, что не всегда приемлемо в условиях сжатых сроков проектирования.

Методы машинного обучения представляют третий подход, который активно развивается в последние годы. Использование нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения позволяет системам «обучаться» на примерах существующих проектных решений и генерировать новые варианты, соответствующие заданным критериям.

Проведенное исследование показало, что системы на основе машинного обучения особенно эффективны для задач, где имеется большой объем исторических данных: проектирование типовых элементов, прогнозирование энергетических характеристик, оптимизация стоимости строительства. Так, разработанная авторами модель на основе глубокого обучения для прогнозирования энергопотребления зданий продемонстрировала точность 92 %, что значительно превосходит традиционные аналитические методы.

Однако внедрение методов машинного обучения в архитектурное проектирование сталкивается с рядом препятствий: необходимость в больших объемах качественных данных для обучения, сложность интерпретации результатов, а также высокие требования к вычислительным ресурсам. Кроме того, как отмечают 87 % опрошенных экспертов, существует риск «творческой стагнации», когда система обучается на существующих примерах и не может генерировать принципиально новые решения.

Агентное моделирование — четвертый подход, основанный на симуляции поведения множества независимых агентов, взаимодействующих в виртуальной среде. Этот метод наиболее эффективен для задач, связанных с оптимизацией потоков людей, функциональным зонированием и эргономикой пространств.

Разработанная авторами агентная модель для оптимизации планировочных решений многофункционального комплекса позволила на 18 % повысить эффективность использования площадей при одновременном улучшении показателей пешеходной доступности ключевых зон.

Сравнительный анализ эффективности различных подходов к генеративному дизайну для типовых архитектурных задач представлен в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительная эффективность подходов к генеративному дизайну

Тип задачи	Параметрическое моделирование	Эволюционная оптимизация	Машинное обучение	Агентное моделирование
Фасадные системы	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Объемно-планировочные решения	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Конструктивные элементы	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
Энергоэффективность	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая
Функциональное зонирование	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Организация потоков	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

Одной из ключевых задач исследования была разработка методологии перевода разнородных требований заказчиков в формализованные параметры, пригодные для использования в генеративных алгоритмах. Анализ технических заданий на проектирование показал, что требования заказчиков можно разделить на явные (четко сформулированные количественные параметры) и неявные (качественные характеристики, часто выраженные нечеткими понятиями).

Для формализации явных требований создана система шаблонов и алгоритмов, позволяющая автоматически извлекать количественные параметры из текста технического задания и преобразовывать их в переменные генеративной модели. Эта система реализована в виде программного модуля, интегрируемого с BIM-платформами.

Более сложную задачу представляла формализация неявных требований. Для решения этой проблемы разработан метод квантификации качественных характеристик на основе экспертных оценок и лингвистического анализа. Метод включает следующие этапы:

1. Выделение ключевых лингвистических маркеров, характеризующих качественные требования (например, современный, экологичный, комфортный).
2. Определение для каждого маркера набора измеримых параметров, коррелирующих с данной характеристикой.
3. Установление весовых коэффициентов для каждого параметра на базе экспертных оценок.
4. Преобразование лингвистических выражений в числовые значения с помощью методов нечеткой логики.
5. Интеграция полученных параметров в целевую функцию генеративного алгоритма.

Например, требование «современный экологичный фасад» трансформировалось в набор количественных параметров: коэффициент естественного освещения ($> 0,8$), процент использования возобновляемых материалов ($> 65\%$), коэффициент теплопередачи ($< 0,25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$), индекс отражения солнечной энергии (> 78).

Для эстетических требований сформирован специальный метод на основе когнитивного картирования, позволяющий преобразовывать субъективные предпочтения в геометрические параметры. Метод основан на анализе визуальных референсов, предоставляемых заказчиком, и автоматическом извлечении из них формообразующих параметров: пропорций, ритмических структур, материальности и текстур.

Проведенное тестирование показало, что разработанная методология дает возможность формализовать до 83 % требований из типового технического задания, что значительно превосходит существующие подходы (рис. 2).

На основе результатов анализа и экспериментального моделирования была разработана комплексная методология интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы. Методология представляет собой пошаговую последовательность действий, охватывающую весь цикл проектирования от предпроектного анализа до оценки результатов.

Ключевым элементом методологии служит концепция цифрового двойника требований (Digital Requirements Twin — DRT) — структурированного набора данных, включающего формализованные требования заказчика, нормативные ограничения, контекстуальные условия и метрики для оценки решений. DRT выполняет роль связующего звена между традиционным процессом формирования технического

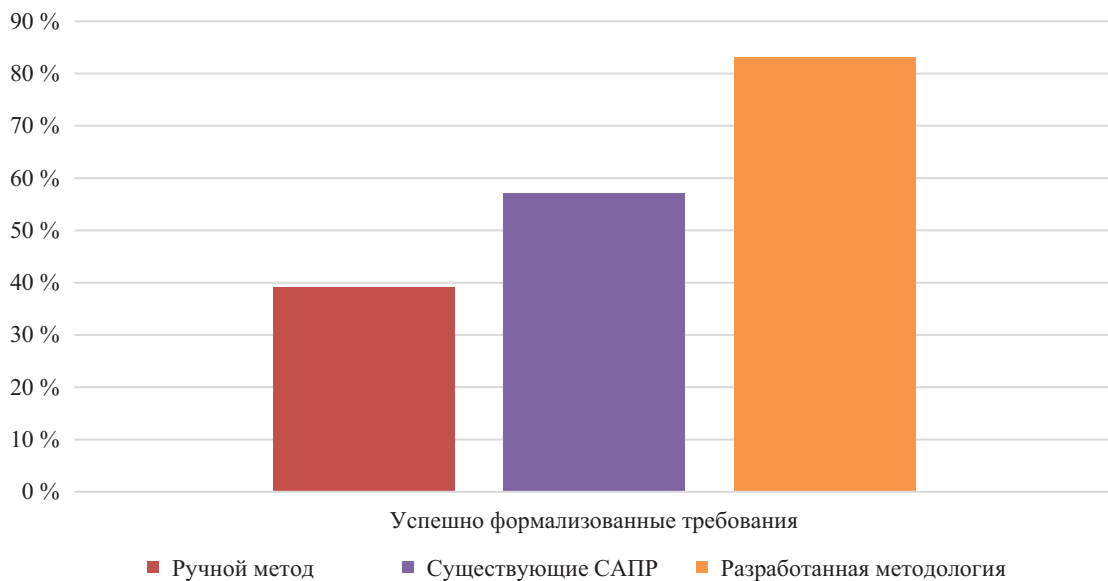


Рис. 2. Сравнительная диаграмма эффективности формализации требований

7. Детализация и интеграция в ВИМ-модель. Выбранное решение детализируется и интегрируется в полноценную ВИМ-модель, содержащую всю необходимую информацию для дальнейшей разработки проекта.

Для общественно-делового центра основной фокус был сделан на оптимизации энергетических характеристик здания.

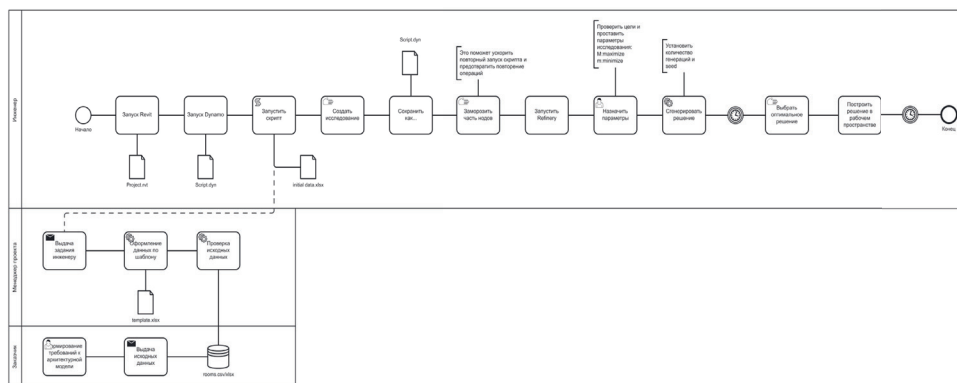


Рис. 3. BPMN схема интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы

Табл. 2. Результаты применения генеративного дизайна на реальных проектах

Показатель	Многофункциональный жилой комплекс	Общественно-деловой центр	Центр обработки данных
Сокращение времени проектирования, %	38	42	35
Количество рассмотренных вариантов	32	25	19
Соответствие требованиям заказчика, %	92	89	94
Улучшение энергоэффективности, %	24	31	18
Оптимизация стоимости строительства, %	12	8	15
Удовлетворенность заказчика (по 10-балльной шкале)	8,7	8,2	9,1

Генеративный алгоритм на основе машинного обучения анализировал влияние различных геометрических параметров, ориентации и светопрозрачных конструкций на энергопотребление. В результате:

- энергопотребление здания снизилось на 31 % по сравнению с первоначальным проектом;
- уровень естественного освещения основных рабочих зон увеличился на 22 %;
- оптимизация формы здания привела к снижению ветровых нагрузок на 18 %, что позволило оптимизировать несущие конструкции.

В проекте центра обработки данных ключевой задачей стала оптимизация расположения помещения для обеспечения усовершенствования прокладки инженерных систем. Применение агентного моделирования позволило это симитировать и оптимизировать планировочные решения. Результаты включают:

- сокращение средних дистанций между основными функциональными зонами на 24 %;
- уменьшение потенциальных точек скопления инженерных сетей на 47 %;
- оптимизацию расположения технических и вспомогательных помещений, приведшую к высвобождению 280 м² полезной площади.

Во всех трех случаях применение генеративного дизайна дало возможность не только улучшить количественные показатели, но и добиться высокого уровня удовлетворенности заказчиков, что подтверждается результатами проведенных интервью и опросов.

Однако, несмотря на значительные успехи, при внедрении генеративного дизайна в BIM-процессы выявлены и определенные ограничения:

1. Технологические барьеры. Существующие BIM-платформы не всегда обеспечивают необходимый уровень программного взаимодействия с инструментами генеративного дизайна. Часто требуется разработка дополнительных интерфейсов и конвертеров данных.

2. Вычислительная сложность. Для комплексных проектов генерация и оценка большого количества вариантов может требовать значительных вычислительных ресурсов. Так, эволюционная оп-

тимизация многофункционального комплекса потребовала 38 ч непрерывных вычислений на рабочей станции с 24-ядерным процессором и 128 ГБ оперативной памяти.

3. Компетенции специалистов. Разработка эффективных генеративных моделей требует специфических навыков на стыке архитектуры, программирования и математической оптимизации. По результатам опроса лишь 12 % архитектурных бюро имеют в штате специалистов, обладающих всеми необходимыми компетенциями.

4. Сложность формализации субъективных критериев. Несмотря на разработанные методы, перевод эстетических и эмоциональных аспектов проектирования в измеримые параметры остается сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

5. Психологические барьеры. Многие архитекторы воспринимают генеративный дизайн как угрозу творческому аспекту профессии. Интервью показали, что 43 % архитекторов опасаются, что автоматизация проектирования приведет к стандартизации и потере индивидуальности архитектурных решений.

Для преодоления этих ограничений разработаны рекомендации, включающие технологические аспекты (развитие интероперабельности, оптимизация алгоритмов) и организационные меры (программы обучения, методики внедрения, изменение рабочих процессов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует, что интеграция генеративного дизайна в BIM-процессы представляет собой перспективное направление развития архитектурного проектирования, способное значительно повысить эффективность и качество проектных решений. Разработанная методология обеспечивает структурированный подход к внедрению генеративных технологий в практику архитектурных бюро.

Ключевой результат исследования — подтверждение гипотезы о том, что генеративный

дизайн позволяет не только автоматизировать рутинные аспекты проектирования, но и расширить творческие возможности архитекторов, предоставляя им инструменты для исследования большого количества вариантов и выявления неочевидных решений. Архитектор в этой парадигме выступает не только как создатель форм, но и как стратег, определяющий правила и критерии генерации решений.

Экспериментальная апробация продемонстрировала, что наиболее эффективно не изолированное применение одного из подходов к генеративному дизайну, а их комбинация, адаптированная к специфике конкретного проекта. Так, для оптимизации объемно-планировочных решений наилучшие результаты показало сочетание параметрического моделирования (для определения базовой геометрии) с эволюционной оптимизацией (для тонкой настройки параметров).

Результаты исследования согласуются с работами Йана и Нгуена, которые также отмечали высокий потенциал генеративных методов для оптимизации архитектурных решений. Вместе с тем настоящее исследование дополняет существующую литературу детальной методологией интеграции этих методов в BIM-процессы и практическими рекомендациями по преодолению технологических и организационных барьеров.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для архитектурно-строительной отрасли. Разработанная методология может быть внедрена в практику архитектурных бюро различного масштаба, позволяя им повысить эффективность проектирования и качество предлагаемых решений. Особенно ценна возможность быстрого исследования большого количества вариантов на ранних стадиях проектирования, когда стоимость изменений минимальна, а их влияние на итоговые характеристики проекта максимально.

С точки зрения научной новизны, ключевым вкладом является систематизация подходов к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы

и разработка методологии формализации субъективных требований заказчиков. Это создает основу для дальнейших исследований в области цифровой трансформации архитектурного проектирования.

Перспективные направления дальнейших исследований:

- разработка методов машинного обучения для автоматической интерпретации неформализованных требований заказчиков, включая анализ естественного языка и компьютерное зрение для обработки визуальных референсов;
- создание специализированных библиотек типовых генеративных компонентов, адаптированных для решения конкретных архитектурных задач и интегрируемых с существующими BIM-платформами;
- изучение методов распределенных вычислений для ускорения процессов генерации и оценки вариантов проектных решений, что особенно актуально для крупных и сложных проектов;
- разработка систем смешанной реальности для интерактивного взаимодействия архитекторов и заказчиков с генеративными моделями, позволяющих в реальном времени видеть и оценивать влияние изменения параметров на проектное решение;
- интеграция генеративного дизайна с технологиями цифрового производства, создание замкнутого цикла от проектирования до изготовления компонентов здания.

В заключение следует отметить, что цифровая трансформация архитектурного проектирования находится в начальной стадии, можно ожидать дальнейшего развития генеративных технологий по мере совершенствования алгоритмов, увеличения вычислительных мощностей и накопления опыта их практического применения. Генеративный дизайн не заменяет творческую роль архитектора, но расширяет его возможности, позволяя сосредоточиться на стратегических аспектах проектирования и инновационных решениях, оставляя рутинные задачи алгоритмам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорожкина Е.А. Аналитический обзор применения программного обеспечения информационного моделирования для разработки проектной документации // Инновации и инвестиции. 2023. № 2. С. 171–174. EDN PNBVYN.
2. Аминов Р.Р. Нормативное регулирование BIM-технологий, прохождение госэкспертизы // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2 (74). С. 20–28. EDN AMDCIV.
3. Субботин Д.В. Концепция внедрения информационно-строительного моделирования объектов в деятельность отечественных компаний // Индустриальная экономика. 2023. № 1. С. 109–116. DOI: 10.47576/2712-7559_2023_1_109. EDN FMCHJD.
4. Cuellar Lobo J.D., Lei Z., Liu H., Li H.X., Han S. Building Information Modelling- (BIM-) Based Generative Design for Drywall Installation Planning in Prefabricated Construction // Advances in Civil Engineering. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/6638236
5. Паршина С.В., Нuzина Т.А. BIM-комплекс Renga — российский программный продукт // Основы экономики, управления и права. 2019. № 1 (19). С. 53–56. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_53. EDN GHXWQS.
6. Kasperzyk C., Kim M., Brilakis I. Automated prefabrication system for buildings using robotics // Automation in Construction. 2017. Vol. 83. Pp. 184–195. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.002

7. *Nguyen T., Tran H.* The Integration of Generative Design and BIM for Sustainable Urban Development // Sustainability. 2022. Vol. 14. Pp. 1–15.
8. *Гвоздицкий М.А., Огороднова Ю.В., Лейтес Д.С.* Принципы построения среды общих данных информационной модели строительного объекта в облачном сервисе // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 3. С. 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81. EDN TFXSIT.
9. *Rybakova A.* Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 211–219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22
10. *Клевцова К.С.* Инновационное модульное строительство // Молодой ученый. 2017. № 3 (137). С. 103–105. EDN XQZDIT.
11. *Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M.* Building information modelling for off-site construction: Review and future directions // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 72–91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010
12. *Sabet P.G.P., Chong H.Y.* Interactions between building information modelling and off-site manufacturing for productivity improvement // International Journal of Managing Projects in Business. 2019. Vol. 13. Issue 2. Pp. 233–255. DOI: 10.1108/ijmpb-08-2018-0168
13. *Farmer M.* The Farmer Nstruction Labour Model // Construction Leadership Council. 2016.
14. *Чибирикова Д.А., Атаев Б.С., Мельникова О.Г.* Модульное проектирование и конструирование многоквартирных домов с использованием готовых компонентов // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 82–86. EDN DSLYML.
15. *Климанов С.Г., Громов В.Н.* Системный подход к проблеме проектирования и строительства быстровозводимых сооружений для обустройства войск в районах Арктики // Актуальные проблемы военнo-научных исследований. 2021. № 1 (13). С. 319–335. EDN ZREDMP.
16. *Зеленцов Л.Б., Шогенов М.С., Пирко Д.В.* Проблемы интеграции проектирования и строительства на основе цифровых технологий // Строительство и архитектура – 2020. Факультет промышленного и гражданского строительства : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 291–292. EDN NXXKOL.
17. *Alshabab M.S., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T.* BIM-based quantity takeoff in Autodesk Revit and Navisworks manage // Proceedings of ECECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering. 2020. Pp. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_36
18. *Кривошейцева Е.А., Корницкая М.Н.* 4D-моделирование зданий с использованием AUTO-DESK NAVISWORKS // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 94–96. EDN HLQWZG.
19. *Rybakova A., Kagan P.* Application of Building Information Modeling in Data Center design // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 2. P. 022006. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022006
20. *Ansah M.K., Chen X., Yang H., Lu L., Lam P.T.I.* Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings // Environmental Impact Assessment Review. 2021. Vol. 90. P. 106618. DOI: 10.1016/j.eiar.2021.106618

Поступила в редакцию 28 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 15 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Эрик Артурович Григорян** — преподаватель, аспирант кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: MSZ-1899-2025, ORCID: 0009-0001-7527-8029; grigorianea@mgsu.ru;

Ангелина Олеговна Рыбакова — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 50423402, Scopus: 57202815558, ResearcherID: AAC-8443-2022, ORCID: 0000-0002-6652-6334; angelinaribakova@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Architectural design is a multifaceted process that traditionally combines creativity and technical precision. However, the increasing complexity of modern projects, the growing volume of information, and shorter design deadlines require new approaches to organizing the design process. The transition from classical methods to digital design tools has created the conditions for the formation of a new approach — generative design in the environment of information modelling of buildings and structures.

Generative design is a process in which design solutions are generated algorithmically based on specified parameters, constraints, and target functions [1]. Unlike traditional design, where solutions appear linearly and sequentially, the generative approach involves the simultaneous formation of multiple options with the possibility of their further evaluation and selection of the optimal ones. The integration of such algorithms with building information modelling (BIM) technology opens up new horizons in the automation of architectural design.

The first experiments with computer-generated architectural forms date back to the 1960s, when the concept of machine design was first proposed. For a long time, the practical application of generative methods in architecture was limited by computing capabilities and the lack of necessary software tools. The situation changed dramatically at the beginning of the 21st century with the development of parametric modelling and the emergence of tools such as Grasshopper (a plug-in for Rhinoceros) and Dynamo (a plug-in for Autodesk Revit), which greatly simplified the development of generative algorithms [2].

At the same time, the development of BIM technologies transformed the design process from the simple construction of geometric models to the comprehensive management of information about a building throughout its entire life cycle [3]. This has created a favourable environment for the introduction of generative methods, as BIM models already contain structured information about all building components, their interrelationships and properties.

Today, there is intensive development of a new direction — computational design, which combines generative methods, parametric modelling, and algorithmic approaches to architectural tasks. However, the integration of generative design into BIM processes faces a number of challenges. For example, Teytin and co-authors note the lack of uniform methods for formalizing design requirements and constraints, which makes it difficult to unify generative algorithms. Yang and Lee [4] point to the complexity of translating subjective aesthetic criteria, which are important to customers, into measurable parameters of generative models.

Despite these difficulties, interest in generative methods in architecture is growing steadily. A study by Müller and Deitel analyzed 126 architectural firms,

of which 67 % use elements of generative design and 89 % plan to expand its use in the next 3–5 years. This indicates the high potential of this direction and its growing importance for the industry.

There are several approaches to implementing generative design in the context of BIM. Currently, there are four main categories: parametric modelling, evolutionary algorithms, machine learning, and agent-based modelling. Each of these methods has its own characteristics, advantages, and limitations that must be taken into account when implementing them in architectural design practice.

Lu and Chen [5] note that the choice of approach to generative design should be determined by the specifics of the tasks being solved. For the design of facade systems, parametric models that take into account geometric and structural constraints are most effective. In turn, when optimizing interior spaces, agent-based models that simulate human behaviour in the environment have an advantage.

Kasperzyuk et al. [6] demonstrated the possibility of using generative algorithms to optimize the acoustic characteristics of rooms. The method they proposed allows for the automatic generation and evaluation of options for the shape and finish of surfaces that provide the specified acoustic parameters.

Although the theory of generative design is actively developing, the practical application of these methods in architectural design faces a number of barriers. Industry experts note that the introduction of generative methods requires a rethinking of traditional design processes and the development of new skills among architects. According to the authors, the future of architecture lies at the intersection of creative thinking and computational methods.

Nguyen and Tran [7] investigated the role of generative design in optimizing the energy efficiency of buildings and concluded that an approach integrated with BIM can reduce energy consumption by 15–23 % by optimizing the geometry of the building, its orientation and the characteristics of translucent structures. The authors emphasize the importance of a comprehensive approach that takes into account not only energy but also economic aspects of design solutions.

The aim of this study is to develop methodological foundations and practical recommendations for integrating generative design into BIM processes to automate the creation of architectural solutions based on diverse customer requirements. To achieve this goal, the following tasks were set:

1. Analyze existing approaches and technologies of generative design applicable in the context of BIM.
2. Develop a methodology for formalizing customer requirements for their integration into generative algorithms.
3. Create and test a comprehensive model for evaluating and selecting generated design solutions using practical examples.

4. Identify promising areas for further development of integrated generative information technologies.

The scientific novelty of the research lies in a systematic approach to the integration of generative methods into BIM processes and the development of a methodology that takes into account both technical and subjective (aesthetic, emotional) aspects of architectural design.

MATERIALS AND METHODS

The research methodology was based on a comprehensive analysis of existing generative design approaches and technologies, their potential and limitations in the context of BIM processes. A multi-stage research structure was developed, including both theoretical and practical components.

The first stage involved a systematic review of the literature covering publications from 2013 to 2023. The Web of Science and Scopus scientific databases, as well as the specialized resources Cumincad and IAARC, were used to select relevant sources. Search queries included combinations of key terms: generative design, computational design, BIM, architectural automation, parametric modelling. As a result of the initial selection, 456 publications were identified, of which 183 were included in the final analysis after assessing their relevance.

For structured analysis, the collected array of publications was classified according to several parameters:

- 1) approach to generative design (parametric, evolutionary, machine learning-based, agent-based) [8–12];
- 2) area of architectural application (spatial planning solutions, facade systems, structural elements, etc.) [13, 14];
- 3) degree of integration with BIM (full, partial, separate);
- 4) stage of practical implementation (conceptual development, prototype, commercial solution).

The second stage involved a comparative study of software platforms and tools that support generative design in the context of BIM [15–19]. The analysis covered both specialized solutions (Dynamo for Revit, Grasshopper for Rhino, Generative Components for Bentley Systems) and universal platforms adaptable for architectural tasks (Project Refinery, Galapagos, Optimo). The tools were evaluated according to the following criteria:

- functional capabilities;
- interoperability with BIM systems;
- accessibility and ease of use;
- flexibility and scalability;
- performance and computational efficiency;
- support and documentation.

The third stage involved developing a methodology for formalizing customer requirements for their integration into generative algorithms [20]. To this end, typical requirements from 25 technical specifications for the design of various types of facilities (residential

buildings, public buildings, industrial facilities) were analyzed. Based on content analysis, these requirements were classified into the following categories:

- regulatory (compliance with building codes and regulations);
- functional (compliance with the intended purpose of the facility);
- economic (construction and operating costs);
- environmental (energy efficiency, environmental friendliness of materials);
- aesthetic (visual characteristics, style);
- socio-cultural (compliance with the social context).

For each category, methods have been developed to quantify and formalize requirements for their integration into generative algorithms. Particular attention was paid to converting qualitative and subjective criteria (such as aesthetic preferences) into measurable parameters.

The fourth stage is devoted to experimental modeling and practical testing of the developed approaches. For this purpose, four experimental models have been created, implementing different approaches to generative design in the BIM environment:

- 1) a parametric model of a facade system with adaptive shading elements;
- 2) an evolutionary model for optimizing the spatial planning solutions of a multi-apartment residential building;
- 3) a machine learning-based model for predicting and optimizing the energy performance of a building;
- 4) an agent-based model for optimizing pedestrian flows within a multifunctional complex.

Each model was developed based on real project data provided by architectural design bureaus, taking into account typical customer requirements. Quantitative metrics (design time, number of options considered, compliance with specified criteria) and expert assessments by practicing architects were used to evaluate the effectiveness of the models.

In order to verify the developed approaches and methodologies, testing was carried out on three real projects:

- 1) a multifunctional residential complex (area 45,000 m²);
- 2) a public and business centre (area 28,000 m²);
- 3) a data processing centre (area 18,000 m²).

For each project, a comprehensive generative algorithm was developed, taking into account the specific requirements of the customer and the characteristics of the object. The results of applying the algorithms were compared with the traditional design process in terms of parameters such as development time, quality of solutions, compliance with requirements, and customer satisfaction.

At the final stage of the research, based on the results obtained, a methodology for integrating generative design into BIM processes was developed, covering

the entire project life cycle from formalization of requirements to evaluation of results. The methodology includes practical recommendations, action algorithms, templates for formalizing requirements, and criteria for evaluating generated solutions.

RESEARCH RESULTS

An analysis of scientific literature and software solutions revealed four dominant approaches to integrating generative design into BIM processes, each with specific advantages and limitations.

Graph-based parametric modelling is the most common approach, implemented in tools such as Dynamo for Revit and Grasshopper for Rhino. These tools allow complex algorithmic designs to be created through visual programming, making them accessible to architects without in-depth programming knowledge. Analysis showed that 76 % of the architectural firms surveyed use this method.

The key advantage of the parametric approach is the high degree of control over the generative process and the transparency of the algorithms. However, significant limitations have also been identified: the complexity of scaling for solving multi-factor problems and the limited ability to self-learn and adapt.

Based on the analysis, a graph was constructed showing the ratio of time spent on different stages of parametric model development, which indicates that setting dependencies and constraints takes the largest share of time (Fig. 1).

Evolutionary optimization is the second common approach, based on the principles of genetic algorithms. Tools such as Galapagos and Octopus for Grasshopper, as well as Project Refinery for Dynamo, allow you to find optimal solutions through iterative evolution of multiple variants. This method is particularly effective

for solving multi-criteria optimization problems, where it is necessary to find a balance between conflicting requirements.

The authors’ experiments have shown that evolutionary algorithms make it possible to consider 5–7 times more design options compared to manual search, which significantly increases the probability of finding the optimal solution. However, a significant drawback is the high computational complexity and time required to achieve convergence. For complex projects, this can take from several hours to several days, which is not always acceptable given tight design deadlines.

Machine learning methods represent a third approach that has been actively developed in recent years. The use of neural networks and other machine learning algorithms allows systems to “learn” from examples of existing design solutions and generate new options that meet the specified criteria.

The study showed that machine learning-based systems are particularly effective for tasks where there is a large amount of historical data: designing standard elements, predicting energy characteristics, and optimizing construction costs. For example, the deep learning-based model developed by the authors for predicting the energy consumption of buildings demonstrated 92 % accuracy, which significantly exceeds traditional analytical methods.

However, the introduction of machine learning methods into architectural design faces a number of obstacles: the need for large amounts of high-quality data for training, the complexity of interpreting results, and high demands on computing resources. In addition, as noted by 87 % of the experts surveyed, there is a risk of “creative stagnation” when the system learns from existing examples and cannot generate fundamentally new solutions.

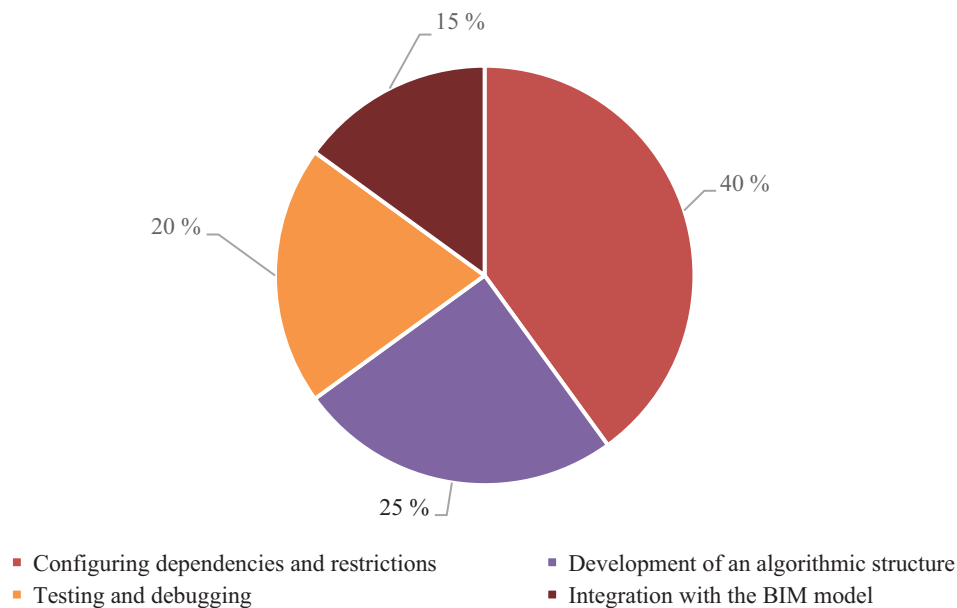


Fig. 1. Graph of the time distribution for the development of a parametric model

Table 1. Comparative effectiveness of approaches to generative design

Problem type	Parametric modelling	Evolutionary optimization	Machine learning	Agent-based modelling
Facade systems	High	Medium	Low	Low
Planning solutions	Medium	High	Medium	High
Structural elements	High	High	Medium	Low
Energy efficiency	Medium	High	High	Low
Functional zoning	Low	Medium	Medium	High
Flow organization	Low	Low	Medium	High

Agent-based modelling is the fourth approach, based on simulating the behaviour of a multitude of independent agents interacting in a virtual environment. This method is most effective for tasks related to optimizing people flows, functional zoning, and space ergonomics.

The agent model developed by the authors to optimize planning solutions for a multifunctional complex made it possible to increase the efficiency of space utilization by 18 % while improving pedestrian accessibility to key areas.

A comparative analysis of the effectiveness of different approaches to generative design for typical architectural tasks is presented in Table 1.

One of the key tasks of the study was to develop a methodology for translating diverse customer requirements into formalized parameters suitable for use in generative algorithms. Analysis of technical design specifications showed that customer requirements can be divided into explicit (clearly formulated quantitative parameters) and implicit (qualitative characteristics, often expressed in vague terms).

To formalize explicit requirements, a system of templates and algorithms was created that allows quantitative parameters to be automatically extracted from the text of the technical specifications and converted into variables of the generative model. This system is implemented as a software module that can be integrated with BIM platforms.

The formalization of implicit requirements presented a more complex task. To solve this problem, a method for quantifying qualitative characteristics based on expert assessments and linguistic analysis was developed. The method includes the following steps:

1. Identification of key linguistic markers characterizing qualitative requirements (e.g., modern, environmentally friendly, comfortable).
2. Determining a set of measurable parameters for each marker that correlate with a given characteristic.
3. Establishing weighting coefficients for each parameter based on expert assessments.
4. Converting linguistic expressions into numerical values using fuzzy logic methods.
5. Integration of the obtained parameters into the objective function of the generative algorithm.

For example, the requirement for a “modern, environmentally friendly façade” was transformed into a set of quantitative parameters: natural lighting coef-

ficient (> 0.8), percentage of renewable materials used ($> 65\%$), heat transfer coefficient ($< 0.25\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), solar energy reflection index (> 78).

For aesthetic requirements, a special method based on cognitive mapping has been developed, allowing subjective preferences to be converted into geometric parameters. The method is based on the analysis of visual references provided by the customer and the automatic extraction of form-defining parameters from them: proportions, rhythmic structures, materiality and textures.

Testing has shown that the developed methodology makes it possible to formalize up to 83 % of the requirements from a typical technical assignment, which significantly exceeds existing approaches (Fig. 2).

Based on the results of analysis and experimental modelling, a comprehensive methodology for integrating generative design into BIM processes was developed. The methodology is a step-by-step sequence of actions covering the entire design cycle from pre-project analysis to evaluation of results.

A key element of the methodology is the concept of a Digital Requirements Twin (DRT) — a structured data set that includes formalized customer requirements, regulatory constraints, contextual conditions, and metrics for evaluating solutions. The DRT acts as a link between the traditional process of forming technical specifications and parametric generative models.

The methodology includes the following main stages:

1. Pre-project analysis and data collection. Information about the design context is collected and structured, including site analysis, climate data, and urban planning restrictions. A digital model of the existing context is created in BIM format.
2. Formalization of requirements. Customer requirements and regulatory constraints are formalized using developed methods and templates. A DRT is formed, containing structured data on requirements and constraints.
3. Selection of a generative approach. Depending on the specifics of the task, the optimal approach to generative design (parametric, evolutionary, machine learning-based, or agent-based) or a combination thereof is selected.
4. Development of a generative model. An algorithmic model is created that can generate design solutions based on specified parameters and constraints. The model

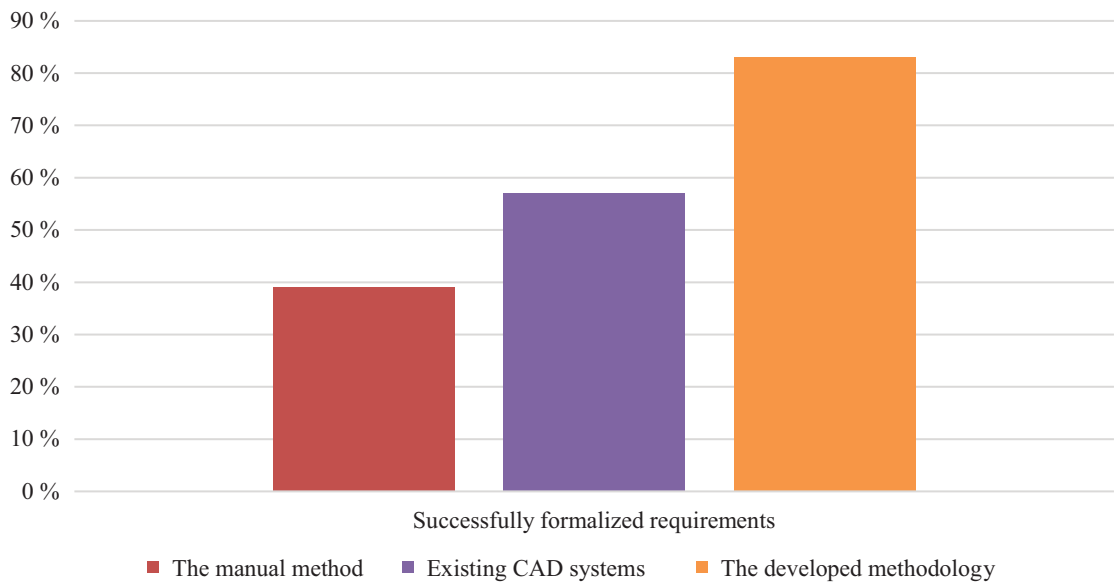


Fig. 2. Comparative diagram of the effectiveness of requirements formalization

is integrated with the BIM platform to ensure bidirectional data exchange.

5. Generation and evaluation of options. The model generates a set of design solutions, each of which is automatically evaluated according to a set of metrics defined in the DRT. The results are visualized using interactive graphs and diagrams to facilitate analysis and comparison of options.

6. Selection and refinement of solutions. The most promising options are selected for further development. This process can be automated (based on target functions) or include expert evaluation by architects and customers.

7. Detailing and integration into the BIM model. The selected solution is detailed and integrated into a complete BIM model containing all the information necessary for further project development.

8. Evaluation and verification of results. The resulting solution is evaluated for compliance with the initial requirements and constraints. Adjustments are made if necessary.

The proposed process for integrating generative design into BIM is shown in Fig. 3.

An important feature of the developed methodology is its flexibility and adaptability. The design process is not linear; it allows for returns to previous stages and iterative improvement of solutions. In addition, the methodology provides for various levels of automation: from fully automatic generation of solutions to an interactive mode where the architect actively participates in the formation and selection of options.

To verify the effectiveness of the developed methodology, it was tested on three real projects of various scales and functional purposes. The results of the testing are presented in Table 2.

The most significant results were achieved in the design of a multifunctional residential complex, where the use of a combined approach (parametric modelling + evolutionary optimization) not only reduced design time by 38 %, but also significantly improved the quality of solutions. In particular:

- optimization of apartment insolation increased the proportion of rooms with optimal natural lighting from 64 to 87 %;
- automated selection of the proportions and rhythm of facade elements made it possible to create a recogniz-

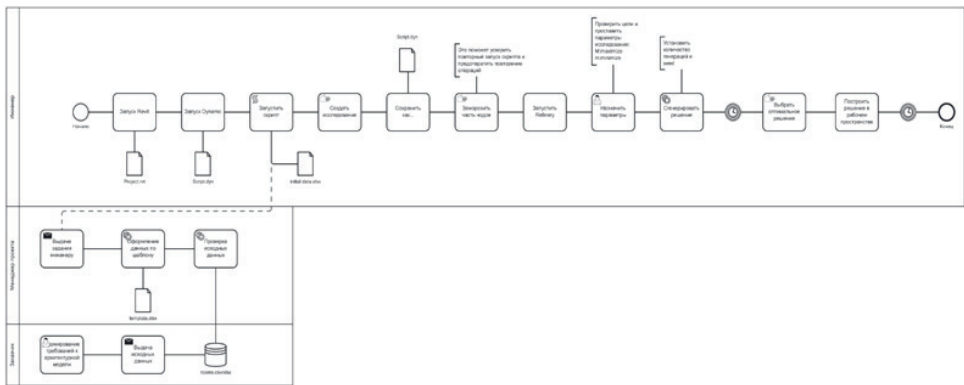


Fig. 3. BPMN scheme for integrating generative design into BIM processes

Table 2. Results of generative design application on real projects

Indicator	Multifunctional residential complex	Public and business centre	Data processing centre
Reduced design time, %	38	42	35
Number of options considered	32	25	19
Compliance with customer requirements, %	92	89	94
Improved energy efficiency, %	24	31	18
Optimization of construction cost, %	12	8	15
Customer satisfaction (on a 10-point scale)	8.7	8.2	9.1

able aesthetic for the complex while reducing the number of unique elements by 38 %, which led to savings in production and installation;

- optimization of internal layouts increased space utilization efficiency by 8.5 %, which is equivalent to an additional 1,470 m² of saleable space.

For the public and business centre, the main focus was on optimizing the building’s energy performance.

A generative algorithm based on machine learning analyzed the impact of various geometric parameters, orientation and translucent structures on energy consumption. As a result:

- the building’s energy consumption was reduced by 31 % compared to the initial design;
- the level of natural lighting in the main work areas increased by 22 %;
- optimization of the building’s shape led to an 18 % reduction in wind loads, which made it possible to optimize the load-bearing structures.

In the data centre project, the key task was to optimize the layout of the premises to improve the routing of engineering systems. The use of agent-based modelling made it possible to simulate and optimize planning solutions. The results include:

- reduction of average distances between main functional areas by 24 %;
- reduction of potential points of concentration of engineering networks by 47 %;
- optimization of the location of technical and auxiliary rooms, resulting in the release of 280 m² of usable space.

In all three cases, the use of generative design made it possible not only to improve quantitative indicators, but also to achieve a high level of customer satisfaction, as confirmed by the results of interviews and surveys.

However, despite significant successes, certain limitations have been identified in the implementation of generative design in BIM processes:

1. Technological barriers. Existing BIM platforms do not always provide the necessary level of software interaction with generative design tools. Often, additional interfaces and data converters need to be developed.
2. Computational complexity. For complex projects, generating and evaluating a large number of options can require significant computational resources. For example, the evolutionary optimization of a mul-

tifunctional complex required 38 hours of continuous computation on a workstation with a 24-core processor and 128 GB of RAM.

3. Specialist competencies. Developing effective generative models requires specific skills at the intersection of architecture, programming, and mathematical optimization. According to the survey results, only 12 % of architectural firms have specialists on staff who possess all the necessary competencies.

4. The complexity of formalizing subjective criteria. Despite the methods developed, translating the aesthetic and emotional aspects of design into measurable parameters remains a difficult task that requires further research.

5. Psychological barriers. Many architects perceive generative design as a threat to the creative aspect of their profession. Interviews showed that 43 % of architects fear that design automation will lead to standardization and a loss of individuality in architectural solutions.

To overcome these limitations, recommendations have been developed that include technological aspects (development of interoperability, optimization of algorithms) and organizational measures (training programmes, implementation methodologies, changes in work processes).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study demonstrates that the integration of generative design into BIM processes is a promising direction for the development of architectural design, capable of significantly improving the efficiency and quality of design solutions. The developed methodology provides a structured approach to the implementation of generative technologies in the practice of architectural firms.

The key result of the study is the confirmation of the hypothesis that generative design not only automates routine aspects of design, but also expands the creative possibilities of architects by providing them with tools to explore more options and identify non-obvious solutions. In this paradigm, the architect acts not only as a creator of forms, but also as a strategist who defines the rules and criteria for generating solutions.

Experimental testing has shown that the most effective approach is not the isolated application of one of the approaches to generative design, but rather a com-

bination of them, adapted to the specifics of a particular project. Thus, to optimize spatial planning solutions, the best results were achieved by combining parametric modelling (to determine the basic geometry) with evolutionary optimization (to fine-tune the parameters).

The results of the study are consistent with the work of Jan and Nguyen, who also noted the high potential of generative methods for optimizing architectural solutions. At the same time, this study complements the existing literature with a detailed methodology for integrating these methods into BIM processes and practical recommendations for overcoming technological and organizational barriers.

The results obtained are of great practical importance for the architectural and construction industry. The developed methodology can be implemented in the practice of architectural firms of various sizes, allowing them to increase the efficiency of design and the quality of the proposed solutions. Particularly valuable is the ability to quickly explore a large number of options in the early stages of design, when the cost of changes is minimal and their impact on the final characteristics of the project is maximized.

From the point of view of scientific novelty, the key contribution is the systematization of approaches to integrating generative design into BIM processes and the development of a methodology for formalizing subjective customer requirements. This creates a basis for further research in the field of digital transformation of architectural design.

Promising areas for further research:

- development of machine learning methods for automatic interpretation of informal customer requirements, including natural language analysis and computer vision for processing visual references;
- creation of specialized libraries of typical generative components adapted to solve specific architectural tasks and integrated with existing BIM platforms;
- studying distributed computing methods to accelerate the generation and evaluation of design options, which is particularly relevant for large and complex projects;
- development of mixed reality systems for interactive interaction between architects and customers with generative models, allowing them to see and evaluate the impact of parameter changes on the design solution in real time;
- integration of generative design with digital manufacturing technologies, creating a closed cycle from design to manufacture of building components.

In conclusion, it should be noted that the digital transformation of architectural design is in its early stages, and further development of generative technologies can be expected as algorithms are refined, computing power increases, and experience in their practical application accumulates. Generative design does not replace the creative role of the architect, but expands their capabilities, allowing them to focus on the strategic aspects of design and innovative solutions, leaving routine tasks to algorithms.

REFERENCES

1. Dorozhkina E.A. Organization of modern living space taking into account the needs of self-isolation in the aspect of eco-recreation. *Innovation & Investment*. 2023; 2:171-174. EDN PNBVYN. (rus.).
2. Aminov R.R. Normative regulation of BIM technologies, passing the state expertise. *Engineering journal of Don*. 2021; 2(74):20-28. EDN AMDCIV. (rus.).
3. Subbotin D.V. The concept of the implementation of information and construction modeling projects in the activities of domestic companies. *Industrial Economics*. 2023; 1:109-116. DOI: 10.47576/2712-7559_2023_1_109. EDN FMCHJD. (rus.).
4. Cuellar Lobo J.D., Lei Z., Liu H., Li H.X., Han S. Building Information Modelling- (BIM-) Based Generative Design for Drywall Installation Planning in Prefabricated Construction. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 1. DOI: 10.1155/2021/6638236
5. Parshina S.V., Nizina T.A. BIM-complex Renga — Russian software product. *Economy, Governance and Law Basis*. 2019; 1(19):53-56. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_53. EDN GHXWQS. (rus.).
6. Kasperzyk C., Kim M., Brilakis I. Automated re-prefabrication system for buildings using robotics. *Automation in Construction*. 2017; 83:184-195. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.002
7. Nguyen T., Tran H. The Integration of Generative Design and BIM for Sustainable Urban Development. *Sustainability*. 2022; 14:1-15.
8. Gvozditky M.A., Ogorodnova Yu.V., Leytes D.S. Principles of creation a common data environment of an information model of building object in a cloud service. *Architecture, Construction, Transport*. 2022; 3:74-81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81. EDN TFXSIT. (rus.).
9. Rybakova A. Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 211-219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22
10. Klevtsova K.S. Innovative modular construction. *Young Scientist*. 2017; 3(137):103-105. EDN XQZDIT. (rus.).
11. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Re-

view and future directions. *Automation in Construction*. 2019; 101:72-91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010

12. Sabet P.G.P., Chong H.Y. Interactions between building information modelling and off-site manufacturing for productivity improvement. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2019; 13(2):233-255. DOI: 10.1108/ijmpb-08-2018-0168

13. Farmer M. The Farmer Nstruction Labour Model. *Construction Leadership Council*. 2016.

14. Chibirikova D.A., Ataev B.S., Melnikova O.G. Modular design and construction of apartment buildings using ready-made components. *Current problems and prospects for the development of the construction complex : collection of works of the International scientific and practical conference*. 2020; 82-86. EDN DSYML. (rus.).

15. Klimanov S.G., Gromov V.N. Timeliness of the topic is caused by the national defense tasks and the objective of the development of the northern borders of our motherland. *Actual Problems of Military Scientific Research*. 2021; 1(13):319-335. EDN ZREDMP. (rus.).

16. Zelentsov L.B., Shogenov M.S., Pirko D.V. Problems of integrating design and construction based on

digital technologies. *Construction and Architecture – 2020. Faculty of Industrial and Civil Engineering : materials of the international scientific and practical conference*. 2020; 291-292. EDN NXXKOL. (rus.).

17. Alshabab M.S., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T. BIM-based quantity takeoff in Autodesk Revit and Navisworks manage. *Proceedings of EECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020; 413-421. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_36

18. Krivosheytsseva Ye.A., Kornitskaya M.N. 4D building modeling using AUTODESK NAVISWORKS. *Polzunovsky Almanac*. 2022; 1:94-96. EDN HLQWZG. (rus.).

19. Rybakova A., Kagan P. Application of Building Information Modeling in Data Center design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(2):022006. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022006

20. Ansah M.K., Chen X., Yang H., Lu L., Lam P.T.I. Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021; 90:106618. DOI: 10.1016/j.eiar.2021.106618

Received March 28, 2025.

Adopted in revised form on April 29, 2025.

Approved for publication on May 15, 2025.

B I O N O T E S : **Erik A. Grigoryan** — lecturer, postgraduate student 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; ResearcherID: MSZ-1899-2025, ORCID: 0009-0001-7527-8029; grigorianea@mgsu.ru;

Angelina O. Rybakova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 50423402, Scopus: 57202815558, ResearcherID: AAC-8443-2022, ORCID: 0000-0002-6652-6334; angelinaribakova@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий

Любовь Андреевна Адамцевич, Азарий Абрамович Липидус

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективность реализации проектов комплексного развития территорий (КРТ) напрямую зависит от применяемых методов управления. В связи с этим актуальным становится вопрос перехода от традиционного объектно-ориентированного управления к комплексному управлению жизненным циклом (ЖЦ) всего проекта в целом. Это приводит к необходимости разработки новых системных критериев для классификации и выбора организационно-технологических решений (ОТР) для каждого этапа ЖЦ объектов строительства. Цель исследования сводилась к разработке системной классификации ОТР для управления ЖЦ объектов строительства в проектах КРТ на основе введенного авторами системного свойства — автономности.

Материалы и методы. Методологической базой исследования являются общая теория систем, принципы и инструменты системотехники строительства, системный анализ, моделирование и управление рисками. Объекты строительства в проектах КРТ рассматриваются как сложные системы, взаимодействующие с внешней средой и декомпозируемые на подсистемы, компоненты и элементы.

Результаты. Сформулирована сущность понятия автономности объекта строительства как эмерджентного свойства, характеризующего его способность функционировать в условиях неопределенности внешней среды. Предложена четырехуровневая классификация ОТР для объектов КРТ, разработана многокритериальная структура для выбора и формирования ОТР, интегрирующая такие параметры, как масштаб системы, этап ЖЦ, уровень управления и уровень автономности.

Выводы. Предложенная классификация дает комплексный инструментарий для принятия управленческих решений, позволяя целенаправленно воздействовать на параметры объекта строительства для достижения требуемого уровня автономности на протяжении всего ЖЦ. Полученные результаты дают основы для развития методов прогностно-мониторингового управления объектами КРТ. Дальнейшие исследования авторов будут посвящены вопросам управления параметрами объекта строительства для обеспечения его автономности в заданные сроки с учетом имеющихся ограничений и определения границ автономности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комплексное развитие территории, системотехника строительства, организационно-технологические решения, систематизация ОТР, управление жизненным циклом, цифровизация строительной отрасли

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Адамцевич Л.А., Липидус А.А. Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 11. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11

Автор, ответственный за переписку: Любовь Андреевна Адамцевич, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

Organizational and technological solutions for managing the life cycle of construction projects in integrated territorial development projects

Liubov A. Adamtsevich, Azariy A. Lapidus

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

ABSTRACT

Introduction. The efficiency of implementation of integrated territorial development projects (ITDP) directly depends on the applied management methods. In this regard, the issue of transition from traditional object-oriented management to integrated management of the life cycle of the entire project becomes relevant. This leads to the need to develop new system criteria for classification and selection of organizational and technological solutions (OTS) for each stage of the life cycle of construction projects. The purpose of the study was to develop a system classification of OTS for life cycle management of construction projects in ITD projects based on the system property introduced by the authors — autonomy.

Materials and methods. The methodological basis of the study is the general theory of systems, principles and tools of system engineering of construction, systems analysis, modeling and risk management. Construction objects in ITD projects are considered as complex systems interacting with the external environment and decomposed into subsystems, components and elements.

Results. As a result, the authors formulated the essence of the concept of autonomy of a construction object as an emergent property characterizing its ability to function in conditions of uncertainty of the external environment. A four-level classification of OTS for ITD objects is proposed, a multi-criteria structure for selecting and forming OTS is developed, integrating such parameters as the scale of the system, the stage of the life cycle, the level of management and the level of autonomy. **Conclusions.** The proposed classification provides a comprehensive toolkit for making management decisions, allowing for a targeted impact on the parameters of the construction object to achieve the required level of autonomy throughout the life cycle. The results obtained provide the basis for developing methods for predictive and monitoring management of ITD objects. Further research by the authors will be devoted to issues of managing the parameters of construction objects to ensure their autonomy within the specified time frame, considering the existing restrictions and determining the boundaries of autonomy.

KEYWORDS: integrated development of territories, construction systems engineering, organizational and technological solutions (OTS), systematization of OTS, life cycle management, digitalization of the construction industry

FOR CITATION: Adamtsevich L.A., Lapidus A.A. Organizational and technological solutions for managing the life cycle of construction projects in integrated territorial development projects. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11

Corresponding author: Liubov A. Adamtsevich, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Реализация проектов комплексного развития территорий (КРТ) подразумевает возведение объектов строительства с разным назначением на единой территории. Традиционные методы управления, фокус внимания которых сосредоточен на отдельных объектах, теряют свою эффективность, и возникает необходимость в использовании интегрированных подходов к управлению жизненным циклом (ЖЦ) не только каждого отдельного объекта, но всего комплекса в целом с учетом координации деятельности всех участников процесса: застройщиков, проектировщиков, подрядчиков, поставщиков, органов власти и других на всех этапах ЖЦ.

В связи с этим актуальным становится вопрос применения универсальной меры или критерия, позволяющего провести классификацию организационно-технологических решений (ОТР) объектов строительства в проектах КРТ на различных уровнях управления. Таким параметром может выступить предложенное авторами системное свойство автономности объектов строительства в проектах КРТ.

В общем случае под автономностью системы примем ее способность сохранять функциональную целостность и адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды (природного и техногенного характера) с минимальным вмешательством, основанную на синтезе ее надежности — вероятностной мере безотказности, устойчивости — сохранении характеристик в допустимых пределах при возмущениях и безопасности — защищенности от комплексных угроз.

Целью исследования является разработка системной классификации ОТР при управлении ЖЦ объектов строительства для проектов КРТ с учетом нового системного свойства — автономности объекта строительства, а также определение подходов к управлению параметрами для обеспечения целевого уровня автономности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве теоретической основы исследования выступают общая теория систем, инструменты и методы, а также основные принципы системотехники строительства, к которым относятся:

- системный подход, рассматривающий строительный объект как единое целое, состоящее из взаимосвязанных элементов;
- комплексность, т.е. учет всех факторов, оказывающих влияние на функционирование системы;
- иерархичность — деление строительного объекта, как системы, на подсистемы разных уровней;
- управление рисками за счет их своевременной идентификации;
- управление ЖЦ строительного объекта, что означает рассмотрение его на протяжении всего жизненного цикла от проектирования и строительства до эксплуатации, реконструкции и сноса.

К основным инструментам и методам системотехники строительства можно отнести системный анализ и системное проектирование, математическое и имитационное моделирование, информационное моделирование и методы управления рисками, включающими идентификацию и оценку рисков, а также разработку мер по их снижению при реализации строительства.

При этом стоит отметить, что цель системотехники строительства — не только снижение затрат и сроков строительства, но и обеспечение устойчивого строительства и развития городов.

Укрупненная схема применения системотехники в строительстве представлена на рис. 1.

Объект данного исследования — строительные объекты в проектах комплексного развития территорий. При этом объекты КРТ рассматриваются не только как система, в которой выделяют подсистемы, компоненты и элементы, но как элементы системы, находящиеся во взаимодействии с окружающей внешней средой. Под подсистемой будем принимать части системы, которым присуща отно-

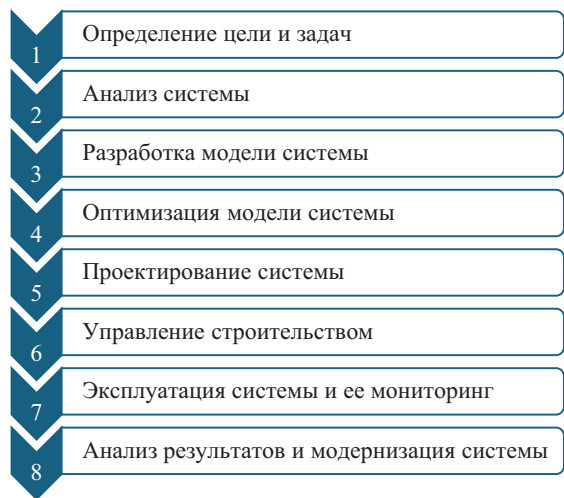


Рис. 1. Алгоритм работы с системой в рамках системотехники строительства

сительная самостоятельность, определяемая степенью свободы, а под элементом системы — неделимую часть системы с однозначно определенными функциями. В то же время, опираясь на общую теорию систем, под компонентом примем любую часть системы, находящуюся во взаимосвязи с другими частями системы (подсистемами или элементами). Рис. 2 иллюстрирует общую структуру системы и взаимодействие ее элементов.

Как указано в работе [1], при реализации проектов КРТ важными являются такие направления, как обеспечение населения жильем, рабочими местами, социальной, дорожной и инженерной инфраструктурой, рассмотрение которых целесообразно в разрезе:

- комплексного развития территории жилой застройки;
- комплексного развития нежилрой застройки;

• комплексного развития незастроенной территории.

Организационно-технологические решения также будут зависеть от этапа ЖЦ объектов строительства в проектах КРТ, в этой связи можно выделить:

1. ОТР на этапе технико-экономического обоснования инвестиций (ТЭО) — комплекс мер, определяющий способ реализации проекта, включающий выбор ключевых технологий, оборудования и методов выполнения СМР; порядок организации строительного процесса во времени и в пространстве; потребность в основных ресурсах; взаимосвязь между участниками проекта. Основная задача ОТР на этапе обоснования инвестиций сводится к созданию технологически и организационно выполнимой модели проекта, достаточной для надежного расчета затрат, сроков, эффективности и обоснования целесообразности инвестиций.

2. ОТР на этапе проектирования объектов строительства — комплекс мероприятий, закладываемых в проект объекта строительства, направленных на обеспечение эффективного функционирования объекта строительства в будущем [2, 3], включая методы организации работ, выбор оборудования, технологические процессы, а также взаимодействие участников проекта. Кроме того, должно быть обеспечено управление рисками за счет их выявления и разработки мероприятий по их минимизации.

3. ОТР на этапе строительства — это комплекс мероприятий, направленных на эффективную организацию и оптимизацию строительного процесса, включая разработку технологических карт, схем производства работ, определение потребности ресурсов, выбор методов строительства и координацию различных этапов работ. Основная цель ОТР на этапе строительства — обеспечение выполнения строительного-монтажных работ в полном соответ-

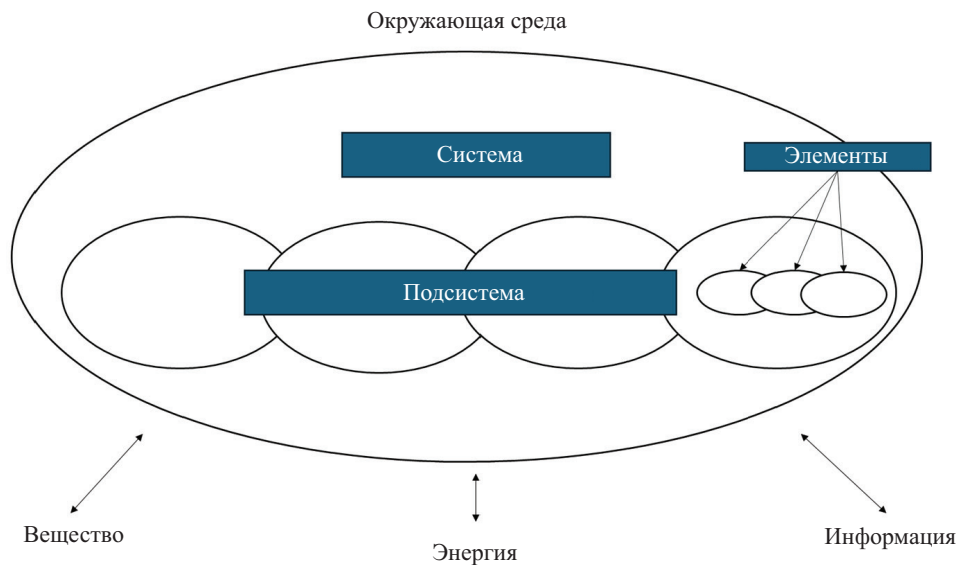


Рис. 2. Структура системы в общем виде

ствии с проектом, в установленные сроки и с требуемым качеством, не только в рамках бюджета, но и с соблюдением норм безопасности и охраны окружающей среды [4, 5].

4. ОТР на этапе эксплуатации — это комплекс мероприятий, процедур, инструментов и систем, направленных на эффективное и безопасное функционирование объекта после его ввода в эксплуатацию. При рассмотрении ОТР на этапе эксплуатации следует отметить, что решения фокусируются на поддержании работоспособности объекта строительства, ОТР на этапе проектирования направлены на предопределение характеристик и условий этой работоспособности [5, 6].

5. ОТР на этапе сноса и утилизации объектов строительства включают разработку проекта, обеспечивающего безопасное и эффективное выполнение работ при демонтаже объекта строительства, учитывая методы раздельного сбора отходов и их утилизацию [7].

В то же время проведенные ранее исследования позволили выявить ключевые технологии Индустрии 4.0, применение которых повысит эффективность реализации проектов КРТ, среди которых ключевые — цифровые двойники (ЦД), технологии информационного моделирования, интернет вещей и прочее.

При этом большинство сложных технических систем, для которых создаются ЦД, обладают фрактальными свойствами, к которым относятся самоподобие, масштабная инвариантность, рекурсивность.

Цифровой двойник, построенный с учетом фрактальной природы, является иерархической сетью взаимосвязанных двойников, что позволяет повысить эффективность применения технологии в проектах КРТ.

Можно говорить о том, что каждый уровень будет фрактальным упрощением или усложнением соседних уровней, при этом данные с нижних уровней агрегируются и используются для калибровки моделей на верхних уровнях, а команды, полученные с верхних уровней, детализируются и исполняются на нижних [8–20].

Кроме того, в концепции цифровых двойников датчики интернета вещей генерируют большие объемы информации, которые также обладают фрактальными свойствами.

Природные и техногенные процессы, оказывающие влияние на эксплуатацию объектов строительства, также фрактальны по своей сути, что дает возможность осуществлять прогноз нагрузок, моделирование износа и старения, и перейти к прогнозномониторинговой модели управления объектами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование позволило сформировать суть системности свойства автономности объектов строительства в разрезе проектов КРТ.

Таким образом, автономность объекта строительства — эмерджентное свойство системы, являющееся результатом целенаправленного проектирования, интеграции и управления множеством взаимосвязанных компонентов: инженерных, технологических, организационных. Данное свойство характеризует объект строительства как активную, устойчивую и адаптивную систему, ориентированную на обеспечение ее функционирования в условиях неопределенности внешней среды, что критически важно при реализации проектов КРТ, где устойчивость, надежность и безопасность систем напрямую оказывают влияние на качество жизнедеятельности населения и устойчивое развитие городов.

Опираясь на системотехнику строительства, по масштабу выделяют следующие уровни: системный, подсистемный, компонентный, элементный. Концептуальная модель принятия ОТР при управлении ЖЦ объектов строительства в проектах КРТ может быть структурирована по следующим уровням:

I. Системный уровень:

I.I проект комплексного развития территории жилой застройки;

I.II проект комплексного развития нежилой застройки;

I.III проект комплексного развития незастроенной территории.

II. Подсистемный уровень:

II.I социальная инфраструктура;

II.II транспортная инфраструктура;

II.III инженерная инфраструктура;

II.IV жилая застройка.

III. Компонентный уровень:

III.I объекты социальной инфраструктуры;

III.I. I дошкольные образовательные учреждения;

III.I.II общеобразовательные организации;

III.I.III больницы (в том числе детские);

III.I.IV поликлиники;

III.I.V продовольственные и непродовольственные магазины;

III.II объекты транспортной инфраструктуры;

III.II.I дорожная сеть, включая автомобильные дороги, мосты, эстакады, тоннели, развязки;

III.II.II железнодорожный транспорт, включая железнодорожные пути и полотно, вокзалы, станции, остановочные пункты, депо и прочее;

III.II.III аэропорты, аэродромы;

III.II.IV морские и речные порты, вокзалы, каналы;

III.II.V общественный транспорт: остановочные комплексы, станции метрополитены, депо, автостанции и прочее;

III.II.VI сопутствующие объекты: АЗС, станции технического обслуживания и прочее;

III.III инженерные сети и коммуникации;

III.III.I объекты водоснабжения и водоотведения;

Масштаб	Система				Подсистема				Компонент				Элемент			
	Стратегический	Тактический	Операционный	Локальный	Стратегический	Тактический	Операционный	Локальный	Стратегический	Тактический	Операционный	Локальный	Стратегический	Тактический	Операционный	Локальный
Уровень управления																
Уровень автономности	П	О	К	П	О	К	П	О	К	П	О	К	П	О	К	П
Обоснование инвестиций																
Проектирование																
Строительство																
Эксплуатация																
Снос/утилизация																

Примечание: П — полная автономность; О — ограниченная (частичная) автономность; К — критическая автономность.

Рис. 3. Структура шаблона разработки ОТР для объектов КРТ

III.III.II объекты электроснабжения;
 III.III.III объекты теплоснабжения;
 III.III.IV объекты газоснабжения;
 III.IV объекты жилой застройки;
 III.IV.I. многоквартирные жилые дома;
 III.IV.II индивидуальные жилые дома;
 III.IV.III гостиницы и аналогичные объекты размещения и прочее.

IV. Элементный уровень:

IV.I конструктивные элементы гражданских и промышленных зданий и сооружений;

IV.I.I фундаменты;
 IV.I.II стены;
 IV.I.III колонны;
 IV.I.IV перекрытия;
 IV.I.V балки и ригели;
 IV.I.VI фермы;
 IV.I.VII лестницы и лифтовые шахты;
 IV.I.VIII перегородки;
 IV.I.IX крыша (кровля);
 IV.I.X полы;
 IV.I.XI ограждающие конструкции (окна);

IV.II конструктивные элементы инженерных сооружений;

IV.II.I опоры;
 IV.II.II пролетные строения;
 IV.II.III земляное полотно;
 IV.II.IV дорожная одежда.

При этом система управления в проектах КРТ является динамическим объектом, где ОТР требуются на каждом этапе ЖЦ. По иерархии управления примем: стратегический уровень управления (преобладают долгосрочные ОТР на горизонт планирования 5 и более лет); тактический (среднесрочные ОТР на 1–3 года); операционный (краткосрочные процессные ОТР) и локальный (срочные ОТР).

По этапам ЖЦ примем ОТР на этапе обоснования инвестиций (наиболее эффективны ОТР стратегические), на этапе проектирования (наиболее эффективны ОТР стратегические и тактические), строительства (преобладают ОТР тактические и операционные), эксплуатации (преобладают ОТР операционные и локальные) и сноса (преобладают тактические и локальные ОТР). Однако стоит отметить, что ОТР разрабатываются для всех этапов ЖЦ и уровней управления.

По уровню автономности выделим полную автономность (П), ограниченную (частичную) автономность (О) и критическую автономность системы (К).

Структура шаблона разработки ОТР по уровню принятия решений по этапам ЖЦ объектов строительства в зависимости от их масштаба и уровня автономности в общем виде представлена на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования разработана структура системной классификации ОТР на этапах ЖЦ объектов КРТ, которая объединяет такие ключевые понятия, как масштаб системы, этап ЖЦ, уровень управления и уровень автономности. Таким образом, появляется возможность управления параметрами объекта строительства для обеспечения его автономности в заданные сроки.

При этом прослеживается четкая взаимосвязь между этапами ЖЦ, где этап обоснования инвестиций и проектирование определяют начальные условия для объектов КРТ, значение уровня их автономности. На данном этапе закладываются такие параметры, как материалы, конструктивные решения, системы безопасности и прочее. Этап строительства влияет на скорость изменения параметров объектов и уровень их автономности, поскольку в этот период теоретические параметры, заложенные на этапе проектирования, переходят в реальные, а их отклонение от проектных меняет динамику деградации объекта и изменение уровня автономности за счет нарушения применяемой технологии строительства, качества монтажа и т.д. Этап эксплуатации отвечает за интенсивность изменений или компенсирующих воздействий. На этапе сноса собираются данные для корректировки проектных нормативов для повышения автономности будущих объектов.

Учет фрактальных свойств при создании цифровых двойников позволяет эффективно применять предложенную иерархическую классификацию, что представляет отдельный интерес для дальнейших исследований в рамках управления автономностью.

Кроме того, дальнейшие исследования авторов будут посвящены вопросам управления параметрами объекта строительства для обеспечения его автономности в заданные сроки с учетом имеющихся ограничений и определения границ автономности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адамцевич Л.А. Управление жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов в проектах комплексного развития территорий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 6. С. 957–966. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966

2. Осипенкова И.Г. Теоретические и практические аспекты разработки организационно-технологических решений в современных условиях // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3 (99). С. 436–444. EDN PBNJNQ.

3. Бидов Т.Х., Котляров М.А., Ахвердашвили Г.Г., Байчоров Р.Х., Урусов А.А. Организационно-технологические решения, влияющие на результативность возведения монолитных конструкций при организации строительства жилых зданий и сооружений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 175–182. EDN LETPIH.

4. Демиденко О.В. Инновационные организационно-технологические решения энергоэффективного строительства // Вестник Омского регионального института. 2018. № 2. С. 65–70. EDN EIUFZU.

5. Батальцев А.В. Проблемы организационно-технологических решений при строительстве и эксплуатации зданий // Фотинские чтения. 2014. № 1 (1). С. 261–263. EDN XXZRYH.

6. Ескалиев М.Ж., Мухаметзянов З.Р. Исследования современного состояния вопроса разработки организационно-технологических решений при строительстве объектов // Экономика строительства. 2022. № 2 (74). С. 52–60. EDN PSUNYE.

7. Дементьева М.Е., Мазурин Д.М. Организация процессов обработки строительных отходов в рамках технологии «Умный снос» // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 10. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-10-10. EDN SJYPDO.

8. Gong H., Su D., Zeng S., Chen X. Parallel simulation and prediction techniques for digital twins in urban underground spaces // Automation in Construction. 2025. Vol. 175. P. 106212. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106212

9. El-Shorbagy M.A., Bouaouda A., Abualigah L., Hashim F.A. Stochastic Fractal Search: A Decade Comprehensive Review on Its Theory, Variants, and Applications // Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2025. Vol. 142. Issue 3. Pp. 2339–2404. DOI: 10.32604/cmcs.2025.061028

10. Fan C., Ding Y., Liu X., Yang K. A review of crack research in concrete structures based on data-driven and intelligent algorithms // Structures. 2025. Vol. 75. P. 108800. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108800

11. Peivaste I., Belouettar S., Mercuri F., Fantuzzi N., Dehghani H., Izadi R. et al. Artificial intelligence in materials science and engineering: Current landscape, key challenges, and future trajectories // Composite Structures. 2025. Vol. 372. P. 119419. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119419

12. Kookalani S., Parn E., Brilakis I., Dirar S., Theofanous M., Faramarzi A. et al. Trajectory of building and structural design automation from generative design towards the integration of deep generative models and optimization: A review // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. P. 110972. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110972

13. Zhang X., Zheng J., Li P., Yang Y., Ye Y., Causone F. et al. A review of building digital twins: Framework and enabling technologies // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 111. P. 113117. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.113117

14. Thomsen A.M.S., Bjørnskov J., Jradi M. Ontology-based Digital Twins for informed decision-making: Scenario testing and optimization in hospital building operations // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 112. P. 113594. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.113594

15. Yoon S., Song J., Li J. Ontology-enabled AI agent-driven intelligent digital twins for building operations and maintenance // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 108. P. 112802. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112802

16. Xue J., Xun X., Wang H., Luo Q. Dynamic generation method for structural components to achieve digital twin displays of building construction progress // Automation in Construction. 2025. Vol. 178. P. 106406. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106406

17. Elshaboury N., AlMetwally W.M., Hesham A., Abbas A. Integrated BIM-GIS framework for holistic building stock assessment using 5D geo-modeling and digital twin concepts // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 111. P. 113391. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.113391

18. Ghansah F.A. Digital twins for smart building at the facility management stage: a systematic review of enablers, applications and challenges // Smart and Sustainable Built Environment. 2025. Vol. 14. Issue 4. Pp. 1194–1229. DOI: 10.1108/SASBE-10-2023-0298

19. Yan J., Lu Q., Li N., Chen L., Pitt M. Common data environment for digital twins from building to city levels // Automation in Construction. 2025. Vol. 174. P. 106131. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106131

20. Xu Y., Zhang J., Qin H., Zhou H., Yang Z. Digital twin-enabled hybrid deep evolutionary framework for smart building sustainable infrastructure management // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. Vol. 65. P. 103773. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103773

Поступила в редакцию 9 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 17 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Любовь Андреевна Адамцевич** — 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; SPIN-код: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru;

Азарий Абрамович Лapidус — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The implementation of integrated territorial development (ITD) projects implies the construction of construction objects with different purposes on a single territory. Traditional management methods that focus on individual objects are losing their effectiveness, and there is a need to use integrated approaches to life cycle management (LCM) not only for each individual object, but for the entire complex as a whole, taking into account the coordination of activities of all participants in the process: developers, designers, contractors, suppliers, authorities and others at all stages of the LCM.

In this connection, the issue of applying a universal measure or criterion that would allow the classification of organizational and technological solutions (OTS) of construction objects in ITD projects at various management levels becomes relevant. Such a parameter can be the system property of the autonomy of construction objects in ITD projects proposed by the authors.

In general, the autonomy of the system is understood as its ability to preserve its functional integrity and adapt to changing environmental conditions (natural and man-made) with minimal intervention, based on the synthesis of its reliability — a probabilistic measure of failure-free operation, stability — preservation of characteristics within acceptable limits under perturbations, and safety — protection from complex threats.

The aim of the research is to develop a system classification of OTS in managing the life cycle of construction objects for ITD projects taking into account a new system property — the autonomy of the construction object, as well as to determine approaches to parameter management to ensure the target level of autonomy.

MATERIALS AND METHODS

The theoretical basis of the study is the general systems theory, tools and methods, as well as the basic principles of systems engineering of construction, which include:

- system approach, which considers the construction object as a single whole consisting of interrelated elements;
- complexity, i.e. taking into account all factors that influence the functioning of the system;
- hierarchy — division of the construction object as a system into subsystems of different levels;

- risk management due to their timely identification;

- life cycle management of a construction object, which means considering it throughout its life cycle from design and construction to operation, reconstruction and demolition.

The main tools and methods of construction system engineering include system analysis and system design, mathematical and simulation modelling, information modelling and risk management methods, including risk identification and assessment, as well as the development of risk mitigation measures during construction.

It should be noted that the goal of construction system engineering is not only to reduce costs and construction time, but also to ensure sustainable construction and urban development.

An enlarged scheme of system engineering application in construction is presented in Fig. 1.

The object of this study is construction objects in projects of integrated territorial development. At the same time, ITD objects are considered not only as a system, in which subsystems, components and elements are distinguished, but also as elements of the system that are in interaction with the surrounding environment. Under a subsystem we will take parts of the system, which have relative independence determined by the degree of freedom, and under an element of the system — an indivisible part of the system with unambiguously defined functions. At the same time,



Fig. 1. Algorithm of working with the system within the framework of construction system engineering

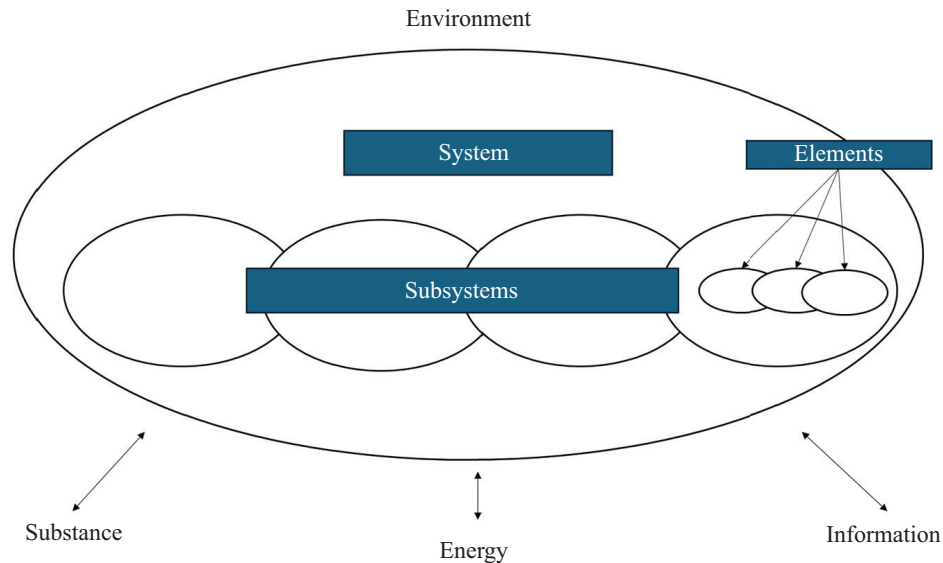


Fig. 2. System structure in general form

based on the general theory of systems, under a component we will take any part of the system that is in interrelation with other parts of the system (subsystems or elements). Fig. 2 illustrates the general structure of the system and the interaction of its elements.

As stated in [1], when implementing ITD projects, it is important to consider areas such as providing the population with housing, jobs, social, road and engineering infrastructure, which should be considered in terms of:

- comprehensive development of residential areas;
- comprehensive development of non-residential construction;
- comprehensive development of undeveloped territory.

Organizational and technological solutions will also depend on the stage of the life cycle of construction objects in ITD projects. In this regard, the following can be distinguished:

1. OTS at the stage of technical and economic justification of investments (TEJ) — a set of measures determining the method of project implementation, including the selection of key technologies, equipment and methods of construction and installation works; the order of organization of the construction process in time and space; the need for basic resources; the relationship between project participants. The main task of OTS at the investment justification stage is to create a technologically and organizationally feasible project model that is sufficient for reliable calculation of costs, deadlines, efficiency and justification of the feasibility of investments.

2. OTS at the construction design stage is a set of measures included in the construction project design aimed at ensuring the effective functioning of the construction project in the future [2, 3], including methods of organizing work, selection of equipment, technological processes, and interaction between project participants. In

addition, risk management must be ensured by identifying risks and developing measures to minimize them.

3. OTS at the construction stage is a set of measures aimed at the effective organization and optimization of the construction process, including the development of technological maps, work schedules, determination of resource requirements, selection of construction methods and coordination of various stages of work. The main objective of OTS at the construction stage is to ensure that construction and installation works are carried out in full compliance with the project, within the established deadlines and with the required quality, not only within the budget, but also in compliance with safety and environmental protection standards [4, 5].

4. OTS at the operational stage is a set of measures, procedures, tools and systems aimed at the effective and safe operation of the facility after it is put into operation. When considering OTS at the operational stage, it should be noted that decisions focus on maintaining the operability of the construction facility, while OTS at the design stage is aimed at predetermining the characteristics and conditions of this operability [5, 6].

5. OTS at the demolition and disposal stage of construction facilities includes the development of a project that ensures the safe and effective performance of work during the dismantling of the construction facility, taking into account methods of separate waste collection and disposal [7].

At the same time, previous studies have identified key Industry 4.0 technologies whose application will increase the efficiency of ITD projects, among which the key ones are digital twins (DT), information modelling technologies, the Internet of Things, and others.

At the same time, most complex technical systems for which DT are created have fractal properties, which include self-similarity, scale invariance, and recursive-ness.

A digital twin built with fractal nature in mind is a hierarchical network of interconnected twins, which allows for more effective application of the technology in ITD projects.

It can be said that each level will be a fractal simplification or complication of neighbouring levels, with data from lower levels being aggregated and used to calibrate models at higher levels, and commands received from higher levels being detailed and executed at lower levels [8–20].

In addition, in the concept of digital twins, Internet of Things sensors generate large amounts of information that also have fractal properties.

Natural and man-made processes that affect the operation of construction objects are also fractal in nature, which makes it possible to forecast loads, model wear and ageing, and move to a predictive and monitoring model of object management.

RESULTS

The study allowed us to form the essence of the systematic nature of the autonomy of construction objects in the context of ITD projects. Thus, the autonomy of a construction object is an emergent property of the system, which is the result of purposeful design, integration, and management of a multitude of interrelated components: engineering, technological, and organizational. This property characterizes a construction object as an active, stable and adaptive system focused on ensuring its functioning in conditions of external uncertainty, which is critically important in the implementation of ITD projects, where the stability, reliability and safety of systems directly affect the quality of life of the population and the sustainable development of cities.

Based on construction systems engineering, the following levels are distinguished in terms of scale: system, subsystem, component, and element. The conceptual model for adopting OTS in the management of the life cycle of construction objects in ITD projects can be structured according to the following levels:

I. System level:

I.I comprehensive development project for residential construction;

I.II comprehensive development project for non-residential construction;

I.III comprehensive development project for undeveloped territory.

II. Subsystem level:

II.I social infrastructure;

II.II transport infrastructure;

II.III engineering infrastructure;

II.IV residential development.

III. Component level:

III.I social infrastructure facilities;

III.I.I preschool educational institutions;

III.I.II general education organizations;

III.I.III hospitals (including children's hospitals);

III.I.IV polyclinics;

III.I.V food and non-food stores;

III.II transport infrastructure facilities;

III.II.I road network, including motorways, bridges, flyovers, tunnels, interchanges;

III.II.II rail transport, including railway tracks and lines, stations, stops, depots, etc.;

III.II.III airports, aerodromes;

III.II.IV sea and river ports, railway stations, canals;

III.II.V public transport: bus stops, metro stations, depots, bus stations, etc.;

III.II.VI related facilities: petrol stations, service stations, etc.;

III.III engineering networks and communications;

III.III.I water supply and sewage facilities;

III.III.II power supply facilities;

III.III.III heat supply facilities;

III.III.IV gas supply facilities;

III.IV residential buildings;

III.IV.I multi-apartment residential buildings;

III.IV.II individual residential buildings;

III.IV.III hotels and similar accommodation facilities, etc.

IV. Element level:

IV.I structural elements of civil and industrial buildings and structures;

IV.I.I foundations;

IV.I.II walls;

IV.I.III columns;

IV.I.IV floors;

IV.I.V beams and girders;

IV.I.VI trusses;

IV.I.VII staircases and lift shafts;

IV.I.VIII partitions;

IV.I.IX roof (roofing);

IV.I.X floors;

IV.I.XI enclosing structures (windows);

IV.II structural elements of engineering structures;

IV.II.I supports;

IV.II.II span structures;

IV.II.III subgrade;

IV.II.IV road surface.

At the same time, the management system in ITD projects is a dynamic object, where OTRs are required at every stage of the life cycle. According to the management hierarchy, we will accept: strategic management level (long-term OTS prevail for a planning horizon of 5 years or more); tactical (medium-term OTS for 1–3 years); operational (short-term process OTS) and local (urgent OTS).

By life cycle stages, we will accept OTS at the investment justification stage (strategic OTS are most effective), at the design stage (strategic and tactical OTS are most effective), construction (tactical and operational OTS prevail), operation (operational and local OTS prevail) and demolition (tactical and local OTS prevail).

Scale	System												Subsystem												Component												Element											
Management level	Strategic				Tactical				Operational				Local				Strategic				Tactical				Operational				Local				Strategic				Tactical				Operational				Local			
Level of autonomy	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C	F	L	C						
Investment rationale																																																
Design																																																
Construction																																																
Exploitation																																																
Demolition/recycling																																																

Note: F — full autonomy; L — limited (partial) autonomy; C — critical autonomy.

Fig. 3. Structure of the OTS development template for ITD facilities

However, it should be noted that OTS are developed for all stages of the life cycle and levels of management.

In terms of autonomy, we distinguish between full autonomy (F), limited (partial) autonomy (L) and critical system autonomy (C).

The structure of the OTS development template by decision-making level for the stages of the construction project life cycle, depending on their scale and level of autonomy, is presented in general terms in Fig. 3.

CONCLUSION

Within the framework of the conducted research the structure of system classification of OTS at the stages of the life cycle of ITD objects has been developed, which combines such key concepts as system scale, life cycle stage, control level and autonomy level. Thus, it becomes possible to control the parameters of the construction object to ensure its autonomy within a given time frame.

There is a clear relationship between the stages of the life cycle, where the stage of investment feasibility and design determine the initial conditions for the ITD objects, the value of their autonomy level. At

this stage, such parameters as materials, design solutions, safety systems, etc. are laid down. The construction stage affects the rate of change in the parameters of the objects and the level of their autonomy, since during this period the theoretical parameters laid down at the design stage turn into real ones, and their deviation from the design ones changes the dynamics of the object degradation and the change in the level of autonomy due to the violation of the applied construction technology, the quality of installation, etc. The operation stage is responsible for the intensity of changes or compensatory impacts. The demolition stage collects data to adjust design standards to improve the autonomy of future facilities.

At the same time, the consideration of fractal properties in the creation of digital twins allows us to effectively apply the proposed hierarchical classification, which is of particular interest for further research in the framework of autonomy management.

In addition, the authors' further research will be devoted to the issues of managing the parameters of the construction object to ensure its autonomy in a given time frame, taking into account the available constraints and defining the boundaries of autonomy.

REFERENCES

1. Adamtsevich L.A. Life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities in projects of integrated development of territories. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):957-966. DOI: 10.22227/1997-0935. 2025.6.957-966 (rus.).
2. Osipenkova I.G. Theoretical and practical aspects of the development of organizational and technological solutions in modern conditions. *Engineering journal of Don*. 2023; 3(99):436-444. EDN PBHJNQ. (rus.).
3. Bidov T.Kh., Kotlyarov M.A., Akhverdashvili G.G., Baychorov R.H., Urusov A.A. Organizational and technological solutions affecting the effectiveness of the construction of monolithic structures in the organization of construction of residential buildings and structures. *Izvestiya Tula State University*. 2020; 6:175-182. EDN LETPIH. (rus.).
4. Demidenko O.V. Innovative organizational and technological solutions for energy-efficient construction. *Bulletin of the Omsk Regional Institute*. 2018; 2:65-70. EDN EIUFZU. (rus.).
5. Batal'tsev A.V. Problems of organizational and technological solutions in the construction and operation of buildings. *Fotinskie Readings*. 2014; 1(1):261-263. EDN XXZRYH. (rus.).
6. Yeskaliyev M.Zh., Mukhametzyanov Z.R. Study of the current state of development of organizational and technological solutions in the construction of facilities. *Construction Economics*. 2022; 2(74):52-60. EDN PSUNYE. (rus.).
7. Dement'eva M., Mazurin D. Organization of construction waste processing processes using "smart demolition" technology. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):10. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-10-10. EDN SJYPDO. (rus.).
8. Gong H., Su D., Zeng S., Chen X. Parallel simulation and prediction techniques for digital twins in urban underground spaces. *Automation in Construction*. 2025; 175:106212. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106212
9. El-Shorbagy M.A., Bouaouda A., Abualigah L., Hashim F.A. Stochastic Fractal Search: A Decade Comprehensive Review on Its Theory, Variants, and Applications. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2025; 142(3):2339-2404. DOI: 10.32604/cmes.2025.061028
10. Fan C., Ding Y., Liu X., Yang K. A review of crack research in concrete structures based on data-driven and intelligent algorithms. *Structures*. 2025; 75:108800. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108800
11. Peivaste I., Belouettar S., Mercuri F., Fantuzzi N., Dehghani H., Izadi R. et al. Artificial intelligence in materials science and engineering: Current landscape, key challenges, and future trajectories. *Composite Structures*. 2025; 372:119419. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119419
12. Kookalani S., Parn E., Brilakis I., Dirar S., Theofanous M., Faramarzi A. et al. Trajectory of build-

ing and structural design automation from generative design towards the integration of deep generative models and optimization : a review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 97:110972. DOI: 10.1016/j.job.2024.110972

13. Zhang X., Zheng J., Li P., Yang Y., Ye Y., Causone F. et al. A review of building digital twins: Framework and enabling technologies. *Journal of Building Engineering*. 2025; 111:113117. DOI: 10.1016/j.job.2025.113117

14. Thomsen A.M.S., Bjørnskov J., Jradi M. Ontology-based Digital Twins for informed decision-making: Scenario testing and optimization in hospital building operations. *Journal of Building Engineering*. 2025; 112:113594. DOI: 10.1016/j.job.2025.113594

15. Yoon S., Song J., Li J. Ontology-enabled AI agent-driven intelligent digital twins for building operations and maintenance. *Journal of Building Engineering*. 2025; 108:112802. DOI: 10.1016/j.job.2025.112802

16. Xue J., Xun X., Wang H., Luo Q. Dynamic generation method for structural components to achieve digital twin displays of building construction progress.

Automation in Construction. 2025; 178:106406. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106406

17. Elshaboury N., AlMetwaly W.M., Hesham A., Abbas A. Integrated BIM-GIS framework for holistic building stock assessment using 5D geo-modeling and digital twin concepts. *Journal of Building Engineering*. 2025; 111:113391. DOI: 10.1016/j.job.2025.113391

18. Ghansah F.A. Digital twins for smart building at the facility management stage: a systematic review of enablers, applications and challenges. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2025; 14(4):1194-1229. DOI: 10.1108/SASBE-10-2023-0298

19. Yan J., Lu Q., Li N., Chen L., Pitt M. Common data environment for digital twins from building to city levels. *Automation in Construction*. 2025; 174:106131. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106131

20. Xu Y., Zhang J., Qin H., Zhou H., Yang Z. Digital twin-enabled hybrid deep evolutionary framework for smart building sustainable infrastructure management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024; 65:103773. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103773

Received September 9, 2025.

Adopted in revised form on September 9, 2025.

Approved for publication on September 17, 2025.

B I O N O T E S : **Liubov A. Adamtsevich** — 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; SPIN-code: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru;

Azariy A. Lapidus — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicting interests.